

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.
Розділ: АСИНХРОННІ МАШИНИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
і контрольні задачі до практичних занять з дисципліни
“Електричні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного
рівня “бакалавр” напрямку підготовки
6.050702 “ Електромеханіка ”

*Рекомендовано Вченою Радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”*

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

УДК 621.313.333

Методичні вказівки і контрольні задачі до практичних занять з дисципліни “Електричні машини”. Розділ “Асинхронні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 38 с.

*Рекомендовано Вченою Радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”
(Протокол №__ від __.__.____ р.)*

На в ч а л ь н е в и д а н н я

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.

Розділ: АСИНХРОННІ МАШИНИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

і контрольні задачі до практичних занять з дисципліни
“Електричні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного
рівня “бакалавр” напряму підготовки
6.050702 “Електромеханіка”

Укладачі: *Васьковський Юрій Миколайович, д-р техн. наук, проф.*
 Гераскін Олександр Анатолійович, канд. техн. наук.

Відповідальний
редактор *В.Ф. Шинкаренко, д-р техн. наук, проф.*

Рецензент *М.Я. Островерхов, канд. техн. наук., доц.*

© НТУУ “КПІ”, 2013

© Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, 2013

ПЕРЕДМОВА

Цей посібник містить методичні вказівки у вигляді основних формул, відомостей та контрольних завдань, які використовуються при проведенні практичних занять з дисципліни "Електричні машини", що вивчається на кафедрі електромеханіки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Зокрема у даному посібнику наведено навчальну інформацію щодо одного з основних розділів курсу – "Асинхронні машини". Використання матеріалу посібника дозволить студентам під час практичних занять закріпити теоретичні знання, які вони отримали при прослуховуванні лекційного курсу. Посібник також може використовуватися студентами інших електромеханічних та електроенергетичних спеціальностей, які вивчають курс "Електричні машини".

В посібнику наведено систематизований список основних формул і співвідношення величин з теорії асинхронних машин, які можуть бути використані при розв'язанні задач. Наведено основні варіанти електричних схем заміщення асинхронних машин, надано детальні приклади розв'язків окремих задач.

Умови типових завдань містять кілька варіантів, що полегшує видачу домашніх завдань і проведення контрольних робіт.

Всі завдання забезпечені відповідями, а в разі набору варіантів, відповідь наведено для першого з них.

Частина завдань має мету навчити студента розраховувати певні характеристики машини за відомими паспортними або каталожними даними. В цьому випадку частина паспортних даних може бути не використана при вирішенні задач.

У посібник включені також домашні завдання по якірним обмоткам машин змінного струму з набором варіантів.

Корисна література, яка допоможе в розв'язанні запропонованих задач, наведена в посиланнях [1-7].

I. Основні формули і співвідношення величин з теорії асинхронних машин	4
II. Приклади розв'язків задач.....	15
III. Контрольні завдання	21
1 Намагнічувальні сили і магнітне поле в асинхронних машинах. Гармонійний аналіз ЕРС	21
2 ЕРС і струми асинхронної машини при нерухомому і рухомому роторі. Параметри схеми заміщення	23
3 Електромагнітні моменти асинхронної машини	26
4 Енергетична діаграма та робочі характеристики асинхронного двигуна...	28
5 Пуск в хід, регулювання швидкості і гальмування асинхронного двигуна.....	32
6 Якірні обмотки трифазних машин змінного струму (домашнє завдання з набором варіантів)	36
Відповіді до завдань	37
Перелік рекомендованої літератури	38

І. ОСНОВНІ ФОРМУЛИ І СПІВВІДНОШЕННЯ ВЕЛИЧИН З ТЕОРІЇ АСИНХРОННИХ МАШИН

1. Основні співвідношення величин в обмотках

Надалі приведено основні формули і співвідношення величин з огляду на використання методу гармонічного аналізу, згідно з яким основні електромагнітні величини (ЕРС, струми, МРС тощо) представлено рядами Фур'є - сукупністю ν гармонік ($\nu = 1, 3, 5, 7 \dots$). Основною гармонікою, на якій відбувається корисне електромеханічне перетворення енергії є перша гармоніка $\nu = 1$.

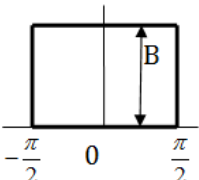
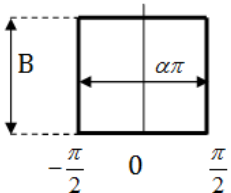
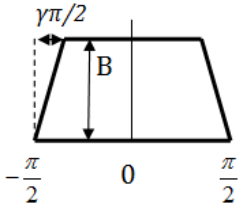
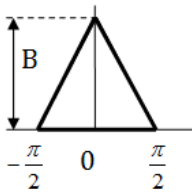
1. $q = \frac{Z}{2pm}$ – кількість пазів на полюс і фазу, де Z – кількість пазів (зубців) магнітопроводу, p – кількість пар полюсів, m – кількість фаз обмотки змінного струму.
2. $W = 2pqW_K$ – кількість витків фази обмотки, де W_K – кількість витків в котушці.
3. $W = \frac{ZS_n}{2ma}$ – кількість витків фази обмотки, де S_n – кількість провідників в пазу, a – кількість паралельних гілок в обмотці.
4. $y_d = \frac{Z}{2p}$ – діаметральний крок обмотки, виражений в зубцевих поділках.
5. $\beta = \frac{y}{y_d}$ – відносне вкорочення кроку обмотки, де y – реальний крок обмотки (відстань між першою і другою сторонами котушки, яка обчислена в зубцевих поділках).
6. $\gamma_{\text{геом}}^\circ = \frac{360}{Z}$ – кут в геометричних градусах між сусідніми пазами магнітопроводу.
7. $\gamma_{\text{ел}}^\circ = \frac{p360\nu}{Z}$ – кут фазового зсуву між ЕРС провідників в сусідніх пазів для ν – ї гармоніки ($\nu = 1, 3, 5, 7 \dots$), виражений в електричних градусах.
8. $K_{\text{об}\nu} = K_{y\nu} \cdot K_{p\nu} \cdot K_{c\nu}$ – обмотковий коефіцієнт для ν – ї гармоніки обмотки без скошу пазів де:
 $K_{y\nu} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2} \nu\right)$ – коефіцієнт скорочення обмотки для ν – ї гармоніки,
 $K_{p\nu} = \frac{\sin \frac{q\nu\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu\pi}{2}}$ – коефіцієнт розподілення обмотки для ν – ї гармоніки,
 $K_{c\nu} = \frac{\sin \frac{b_c \pi \nu}{\tau_2}}{\frac{b_c \pi \nu}{\tau_2}}$ – коефіцієнт скошу паза для ν – ї гармоніки, b_c – величина скошу паза.
9. $F_\nu = \frac{m\sqrt{2}W K_{\text{об}\nu}}{\pi \nu p} I$ – МРС ν -ї гармоніки m -фазної обмотки на полюс, де I – струм

в фазі обмотки.

10. $F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta'$ – МРС повітряного проміжку на один полюс, де $\delta' = \delta K_\delta K_\mu$ – приведений повітряний проміжок машини, K_δ – коефіцієнт повітряного проміжку $K_\mu = \frac{\Sigma F}{F_\delta}$ – коефіцієнт насичення магнітного кола машини.
11. $\tau_v = \frac{\pi D}{2pv}$ – полюсний поділ для v -ї гармоніки.
12. $\Phi_v = \frac{2}{\pi} \tau_v l B_{mv}$ – магнітний потік v -ї гармоніки, де B_{mv} – амплітуда v -ї гармоніки магнітної індукції, l – активна довжина машини.
13. $E_v = \pi \sqrt{2} \Phi_v f_v W K_{обv}$ – діюче значення ЕРС v -ї гармоніки.
14. $E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + \dots + E_v^2}$ – діюче значення ЕРС несинусоїдальної форми (за наявності тільки непарних гармонік).
15. $E_L = \sqrt{3} \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + \dots}$ – лінійна ЕРС при з'єднанні зіркою.

В таблиці 1 представлено розклад деяких функцій в ряд Фур'є.

Таблиця 1

№ п/п	Форма	Амплітуда v -ї гармоніки
1		$B_v = \frac{4}{\pi v} B$
2		$B_v = \frac{4}{\pi v} B \sin \frac{v\alpha\pi}{2}$
3		$B_v = \frac{8B}{\pi^2 v^2 \gamma} \sin \gamma \frac{v\pi}{2} \sin \frac{v\pi}{2}$
4		$B_v = \frac{8B}{\pi^2 v^2} B$

2. ЕРС і струми асинхронної машини при нерухомому і обертовому роторі

1. $n_1 = \frac{60f}{p}$ – швидкість обертання магнітного поля статора.
 2. $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$ – ковзання асинхронної машини, де n – швидкість обертання ротора.
 3. $f_2 = f_1 S$ – частота струму ротора.
 4. $K_e = \frac{W_1 K_{061}}{W_2 K_{062}}$ – ЕРС і напруги
 5. $K_i = \frac{m_1 W_1 K_{061}}{m_2 W_2 K_{062}}$ – струму
 6. $K = K_e K_i = \frac{m_1 W_1^2 K_{061}^2}{m_2 W_2^2 K_{062}^2}$ – опір
- Коефіцієнти приведення обмотки ротора до обмотки статора;

При визначенні коефіцієнтів приведення для короткозамкненої обмотки ротора вважати: $m_2 = N_2$, $W_2 = l/2$, $K_{062} = 1$, де N_2 – кількість стержнів клітки ротора.

$$7. \left. \begin{aligned} E'_2 &= K_e E_2 \\ I'_2 &= \frac{I_2}{K_i} \\ r'_2 &= K r_2; \quad x'_2 = K x_2 \end{aligned} \right\} - \text{Приведення основних електричних величин;}$$

$$8. \quad E_{2S} = 4,44 \Phi f_2 W_2 K_{062} = 4,44 \Phi f_1 S W_2 K_{062} = E_2 S - \text{ЕРС в обмотці ротора.}$$

$$9. \quad I_2 = \frac{E_{2S}}{\sqrt{r_2^2 + x_{\delta 2}^2 S^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + x_{\delta 2}^2}} - \text{струм в обмотці ротора.}$$

$$10. \quad \left. \begin{aligned} \dot{U} &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + j x_{\delta 1}) \\ 0 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \left(\frac{r'_2}{S} + j x'_{\delta 2} \right) \\ \dot{I}_m &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \end{aligned} \right\} - \text{Основні рівняння асинхронної машини.}$$

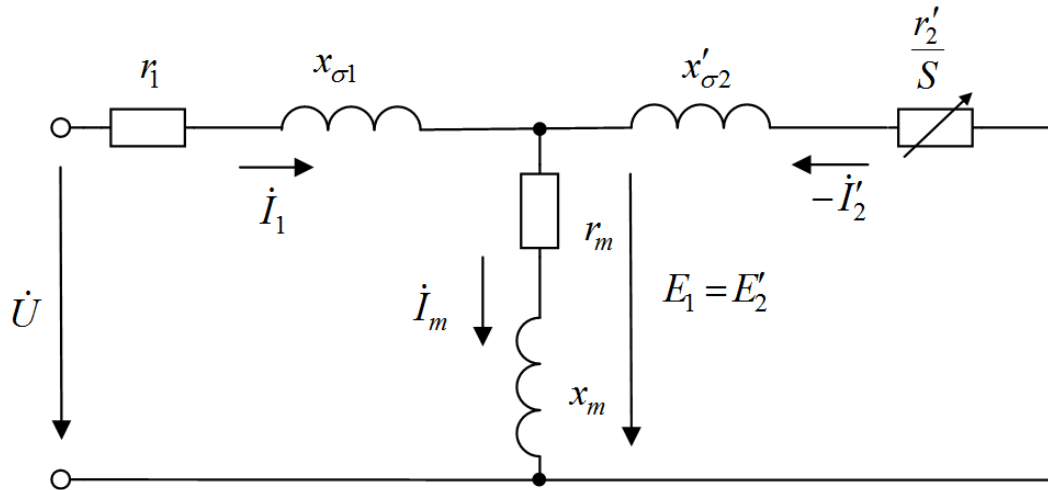
$$11. \quad I_K = I_2 / \sin \frac{\pi p}{N_2} - \text{струм в елементі кільця клітки ротора,}$$

3. Основні схеми заміщення

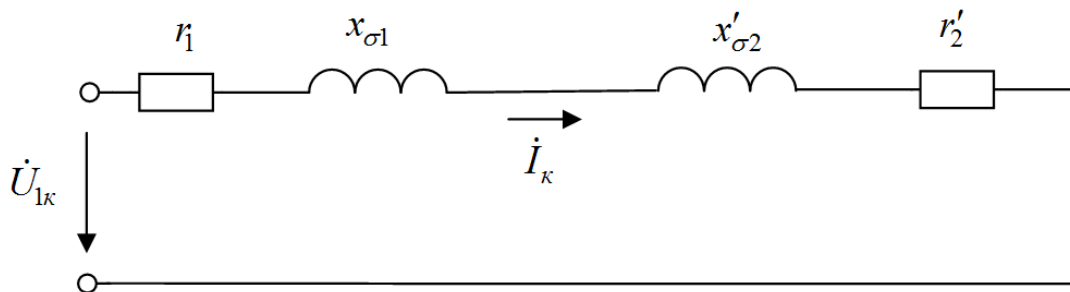
Надалі приведені основні електричні схеми заміщення короткозамкненої асинхронної машини.

1. Асинхронні машини з однією короткозамкненою обмоткою (кліткою) на роторі:

1.1. Т-подібна схема заміщення



При пуску (короткому замиканні) схема спрощується:



Параметри короткого замикання:

$$Z_K = \frac{U_{K\Phi}}{I_{K\Phi}}; r_K = \frac{P_K}{3I_{K\Phi}^2}; x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}; r_1 \approx r_2'; x_1 \approx x_2';$$

Для глибокопазного АД:

$$r_2' = K_r r_{2п}' + r_{2л}', \text{ де } K_r = \varepsilon$$

$$x_2' = K_x x_{2п}' + x_{2л}', \text{ де } K_x = \frac{3}{2} \varepsilon,$$

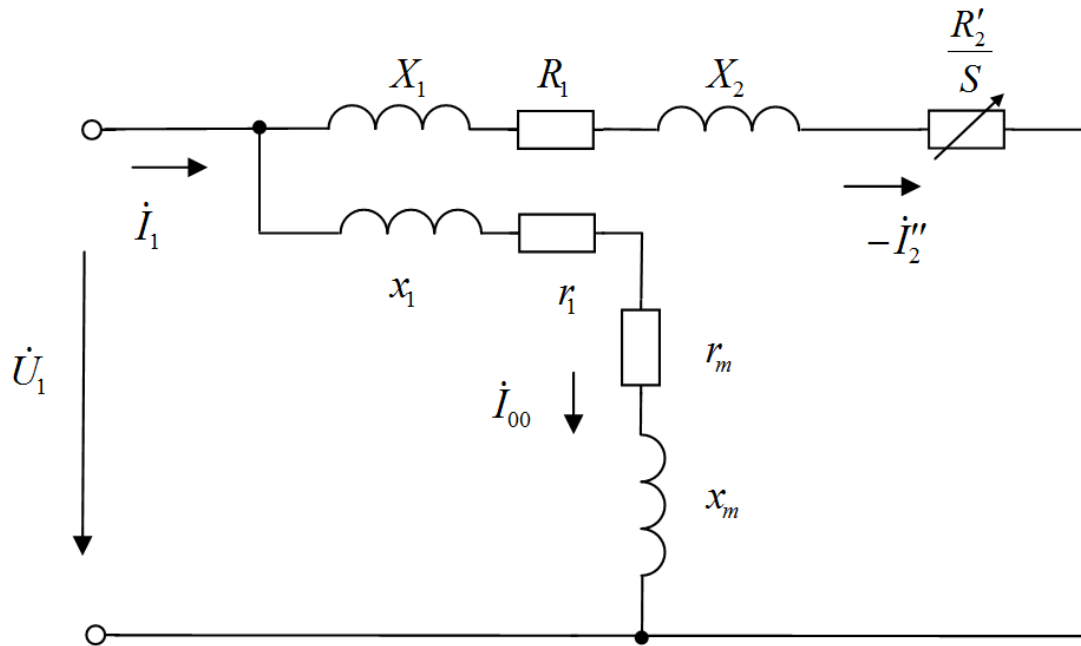
де h_n — глибина паза (см),

$r_{п}, x_{п}, r_{л}, x_{л}$ — активні та індуктивні опори відповідно пазової і лобової частин клітки.

Для міді коефіцієнт $\varepsilon = h_{п}$ [см].

Для алюмінію коефіцієнт $\varepsilon = 0,71\sqrt{S}h_{п}$ [см].

1.2. Г-подібна схема заміщення

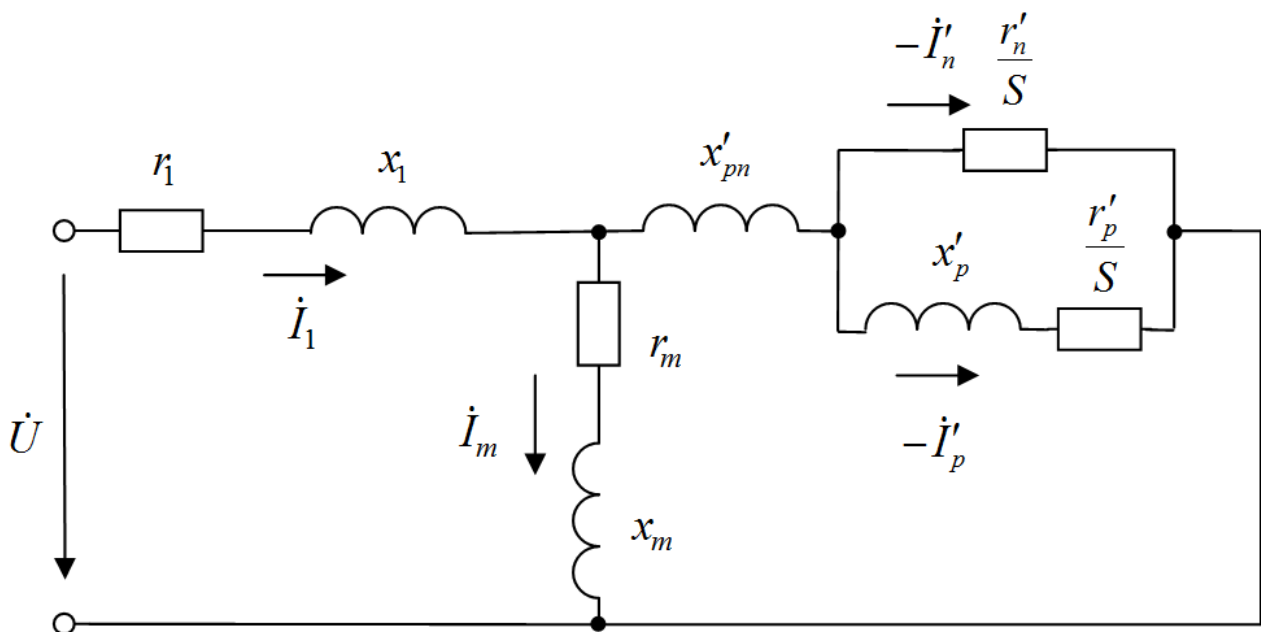


де параметри схеми:

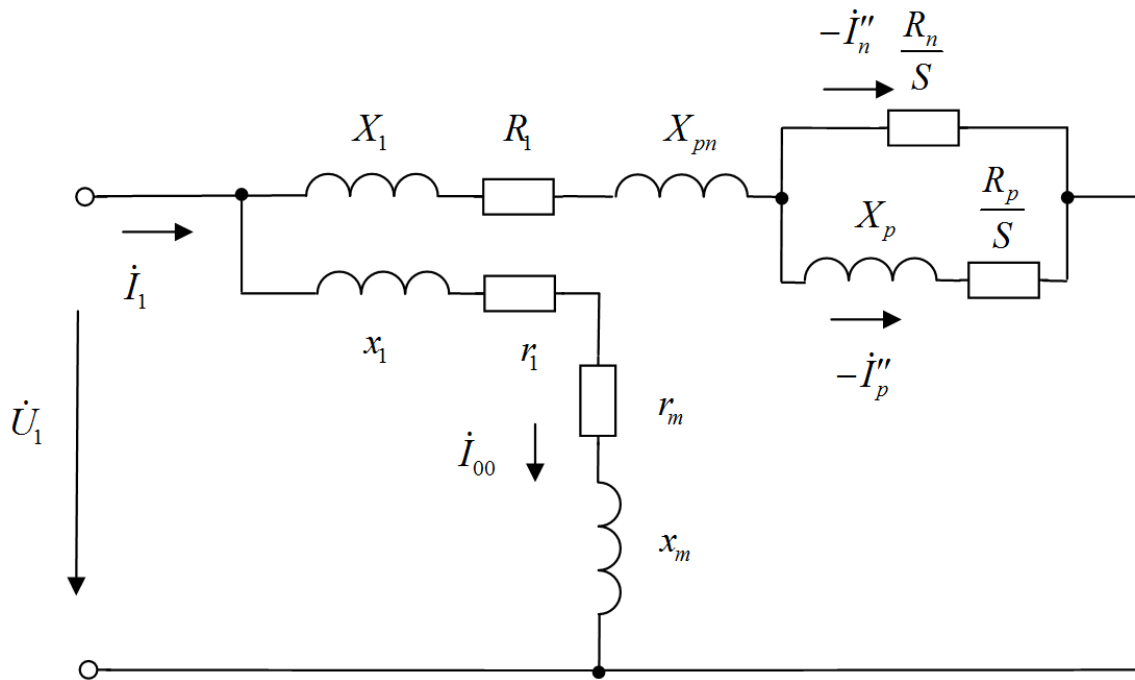
$$\begin{aligned} R_1 &= \sigma_1 r_1; R_2 = \sigma_1^2 r_2' \\ X_1 &= \sigma_1 x_1; X_2 = \sigma_1^2 x_2' \\ \sigma_1 &= 1 + \frac{z_1}{z_m} \approx 1 + \frac{x_1}{x_m} \end{aligned}$$

2. Асинхронні машини з двома короткозамкненими клітками на роторі

2.1. Т-подібна схема заміщення



2.2. Г-подібна схема заміщення



де параметри схеми:

$$X_1 = x_1 \sigma_1;$$

$$R_1 = r_1 \sigma_1;$$

$X_{pn} = x'_{pn} \sigma_1^2$ – загальний індуктивний опір розсіювання обмотки ротора по відношенню до первинної обмотки;

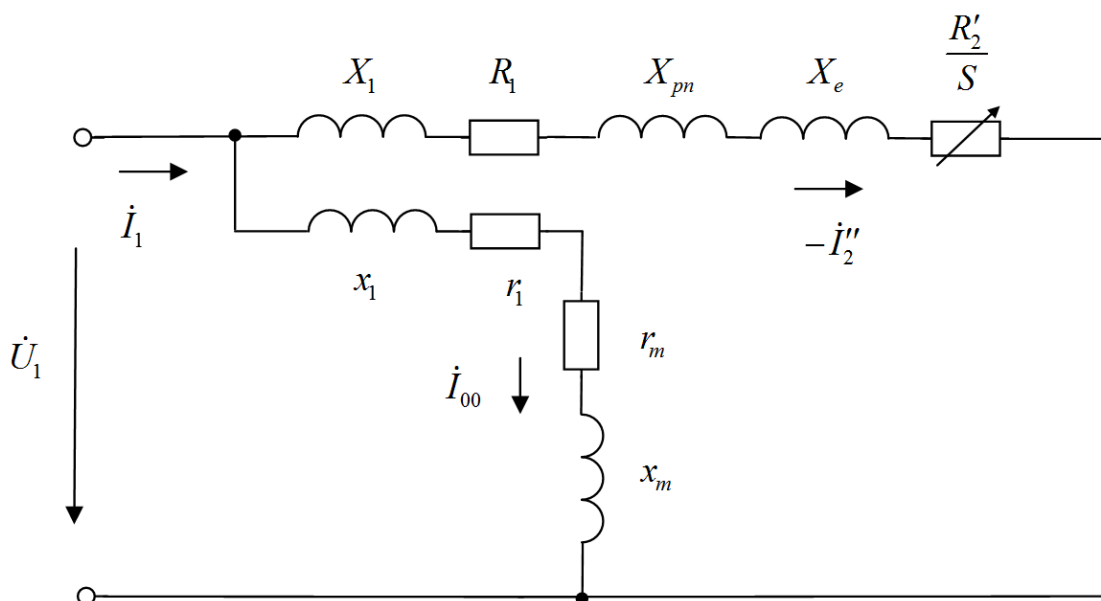
$R_n = r'_{pn} \sigma_1^2$ – активний опір пускової обмотки ротора;

$X_p = x_p \sigma_1^2$ – індуктивний опір робочої обмотки ротора;

$R_p = r_p \sigma_1^2$ – активний опір робочої обмотки ротора.

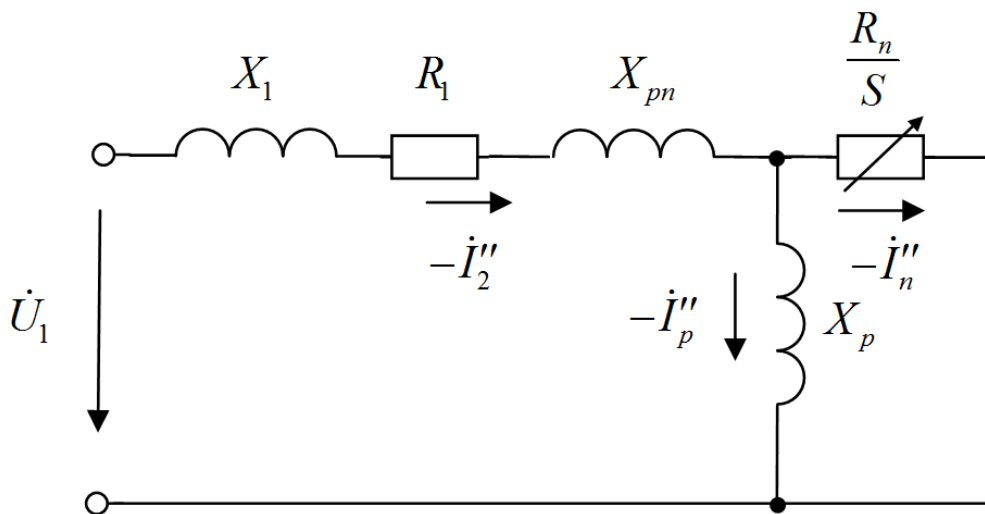
3. Перетворення схеми заміщення:

1) для режиму малих ковзань:

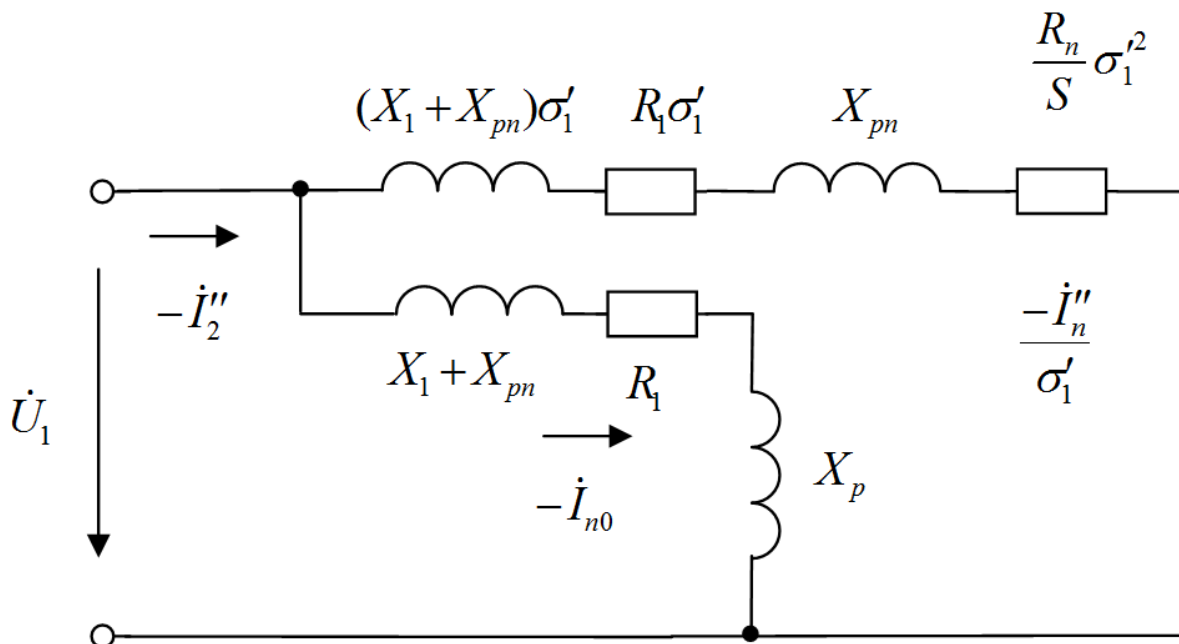


де $R_e = \sigma_1^2 \frac{r'_n \cdot r'_p}{r'_n + r'_p}$; $X_e = \frac{\sigma_1^2 r_n'^2}{(r'_n + r'_p)^2} X_p$.

2) Для режиму великих ковзань ($R_p \approx 0$)



Цю схему часто зручно перетворити до наступного вигляду з винесеним на за- тискачі паралельним контуром:



де $\sigma_1' = 1 + \frac{X_1 + X_{pn}}{X_p}$.

4. Електромагнітний обертовий момент

1. $M = \frac{P_{\text{мех}}}{\Omega_2}$ – обертовий момент

2. $\Omega_1 = 2\pi n_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}$ – кутові швидкості обертання магнітного поля статора і ротора.
 $\Omega_2 = (1 - s)\Omega_1$

3. $M_H = 975 \frac{P_H [\text{кВт}]}{n_H [\text{об/мин}]} [\text{кГн}]$ – номінальний обертовий момент;

4.
$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ем}} &= \frac{p m_1 U_1^2 \frac{R_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} \\ M_{\text{ем}} &= \frac{P_{\text{ем}}}{2\pi n_1} \end{aligned} \right\} \text{ – електромагнітний обертовий момент АМ}$$

де $P_{\text{ем}}$ – електромагнітна потужність машини.

5. $M_{\text{эм}} = \frac{p m_1 U_1^2}{4\pi f_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2} \right)}$ – максимальний електромагнітний момент АМ

6. $S_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}$ – ковзання АМ, при якому досягається максимальний електромагнітний момент.

7.
$$\left. \begin{aligned} M_{\text{п}} &= \frac{p m_1 U_1^2 R_2}{2\pi f_1 (R_K^2 + X_K^2)} \\ M_{\text{п}} &= \frac{m_2 I_2'^2 r_2 p}{2\pi f_1} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2' p}{2\pi f_1} \end{aligned} \right\} \text{ – пусковий момент АД (при ковзанні } s=1).$$

8. $K_M = M_M / M_H$ – коефіцієнт перевантажувальної здатності АД.

9. $K_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_H$ – кратність пускового моменту.

10. $K_I = I_{\text{п}} / I_H$ – кратність пускового струму.

11. $\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$ – формула Клосса.

5. Енергетична діаграма і робочі характеристики асинхронного двигуна

1. $S_1 = 3U_{\phi} I_{\phi}$ – повна електрична потужність, що споживається двигуном.

2. $P_1 = S_1 \cos \varphi = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$ – активна потужність, що споживається двигуном.

3. $P_2 = P_1 \eta = 3U_{\phi} I_{\phi} \eta \cos \varphi$ – потужність на валу двигуна.

4. $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$ – коефіцієнт корисної дії двигуна.

5. $\sum p = P_{M1} + P_{\text{СТ1}} + P_{M2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ – втрати в двигуні.

6. $P_{M1} = m_1 I_1^2 r_1$ – втрати в обмотці статора.

7. $P_{M2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2' = P_{\text{эм}} s$ – втрати в обмотці ротора.

8. $P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{M_1} + P_{\text{СТ}_1})$ – електромагнітна потужність двигуна.
9. $P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - P_{M_2} = P_{\text{эм}}(1 - S)$ – механічна потужність двигуна.
10. $P_{\text{доб}} = 0,005P_1 \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$ – додаткові втрати в двигуні.

6. Побудова кругової діаграми за дослідними даними і визначення робочих характеристик АД

Відкладаємо по осі ординат вектор фазної напруги живлення U , у відповідному масштабі (рис. 1).

За відомим значенням струмів холостого ходу I_0 і короткого замикання $I_{\text{кн}}$ при номінальній напрузі U_n і величинами кутів φ_0 і $\varphi_{\text{к}}$ будуємо ці вектори, зсунувши їх на відповідні кути φ_0 і $\varphi_{\text{к}}$ у співвідношенні до прикладеної напруги U_1

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 I_0 U_1}; \quad \cos \varphi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{m_1 I_{\text{к}} U_1}.$$

Вектори струмів відкладаємо в певному масштабі m_i [А/см].

Таким чином, отримуємо точку реального холостого ходу (G) і точку короткого замикання (K) кругової діаграми $S = 1$.

Точка ідеального холостого ходу (O), ($S=0$) лежить дещо нижче реальної точки холостого ходу. З достатньою точністю точку $S=0$ можна отримати, якщо з точки реального холостого ходу відкласти вертикально вниз ту частину активної складової струму реального холостого ходу, яка відповідає механічним втратам:

$$I_{\text{оамх}} = P_{\text{мх}} / m_p, \text{ де } m_p = m_1 U_1 m_i.$$

При побудові точної кругової діаграми для знаходження лінії центру проводиться лінія OA під кутом

$$2\gamma = \arctg \frac{2r_1}{x_1 + x_m} = \arctg \frac{2I_0 r_1}{U_1}$$

до лінії OL , паралельної осі абсцис. Відновлюємо далі з середини M хорди OK перпендикуляр до перетину з OA в точці O_1 , яка і є центром кола струму. Радіус дорівнює відрізку $OO_1 = O_1K$. Опускаємо з точки K перпендикуляр на OA і ділимо відрізок KK_3 в точці K_2 у співвідношенні

$$\frac{K_2 K_3}{KK_3} = \frac{r_1}{R_K}$$

Проводимо далі, через точки O і K_2 пряму до перетину з колом в точці T , яка є точкою з ковзанням $S = \pm \infty$. Пряма OT в цьому випадку є лінією електромагнітної потужності $P_{\text{эм}}=0$.

Враховуючи, що

$$P_{\text{ем}} = M_{\text{ем}} \cdot \omega_1 = M_{\text{ем}} 2 \pi n_1 \equiv M_{\text{ем}},$$

тобто P_{em} при постійній частоті пропорційна електромагнітному моменту, що розвиває двигун. Отже лінія електромагнітної потужності є в той же час лінією моменту, що розвиває двигун. $M_{em}=0$.

Пряма GK є лінією корисної потужності $P_2=0$.

Пряма OK – лінія механічної потужності $P_{мех}=0$.

Пряма O'E – лінія підведеної потужності $P_1=0$.

Для побудови шкали ковзань проводимо дотичну QT до кола в точці T ($S=\infty$) і лінію PN паралельно лінії QT на такій відстані, щоб відрізок PT=100 KK₂/OK, тоді зручно відкласти на шкалі ковзання поділки S% в масштабі $1\%S=1\text{см}$, якщо всі відрізки в сантиметрах. Шкала для визначення $\cos\varphi$ є відрізком O'F в 100 одиниць по осі ординат. З полюса O' радіусом O'F проводиться частина кола. На цьому побудова кругової діаграми може бути закінчена.

Для визначення робочих характеристик асинхронного двигуна поступають наступним чином.

Задавшись довільною величиною ковзання S з необхідного діапазона (зазвичай $0 \leq S \leq 1,5S_n$), наприклад: $S=S_n$, з'єднують точку S з точкою T. Точка перетину відрізка ST з колом струмів дозволяє визначити (точка D):

а) $I_l = O'D m_i$;

б) $P_2 = DG'' m_p$, де DG'' відрізок перпендикуляра до лінії центра;

в) $\cos \varphi = \frac{O't}{O'F} = \frac{O't}{100}$;

г) $P_{em} = DB'' \cdot m_p$;

д) $P_l = DE'' \cdot m_p$, де DE'' – перпендикуляр на вісь абсцис;

е) Графічні способи визначення ККД недостатньо точні.

Тому ККД визначають методом окремих втрат:

$$\eta = \left(1 - \frac{(P_{M1} + P_{M2} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб})}{P_1} \right) 100\%$$

$$P_{M2} = P_{em} S = DB'' m_p S$$

$$P_{M1} = 3 I_{1\phi}^2 r_1 = 3 (O'D m_i)^2 r_1$$

$$P_{доб} = 0,005 P_1 \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 = 0,005 DE'' m_p$$

$P_{ст} + P_{мех}$ – з досліду холостого ходу

$$\text{ж) } M = P_{эм} \cdot 2\pi n_l ;$$

з) Для визначення перевантажувальної здатності двигуна

$$K_M = \frac{M_M}{M_H}$$

необхідно виконати наступне. З точки O_1 опускаємо перпендикуляр на лінію $P_{cm}=0$ і продовжуємо його до перетину з колом в точці R. Перпендикуляр з точки R на лінію центру RB_4 дає максимальний момент, отже

$$K_M = \frac{RB_4}{DB''}.$$

Кратність пускового моменту визначається наступним чином

$$K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = \frac{KK_2}{DB''}.$$

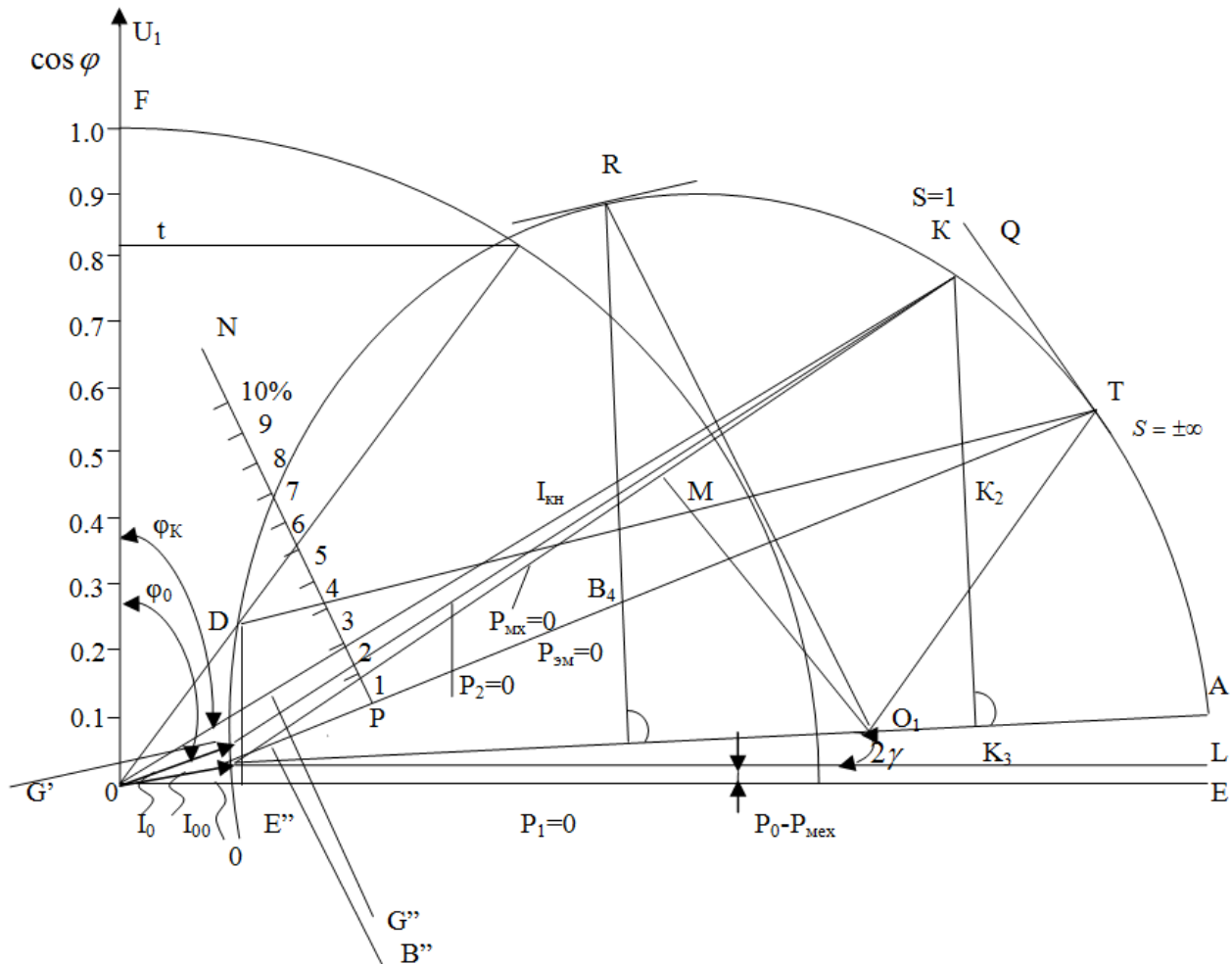


Рис. 1 – Кругова діаграма

II. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗКІВ ЗАДАЧ [2]

Задача 1. Визначити критичне ковзання АД, якщо в досліді КЗ $U_k=1740$ В, $I_k=140$ А, $P_k=170$ Вт. Схема з'єднань – зірка, прийняти $R_1 = R'_2$.

Розв'язок: 1) $Z_k = U_k / 1,73 / I_k = 7,18$ Ом;

2) $R_k = P_k / 3 / I_k^2 = 2,89$ Ом;

3) $X_k = (Z_k^2 - R_k^2)^{1/2} = (51,55 - 8,35)^{1/2} = 6,572$ Ом;

4) $R_l = R'_2 = R_k / 2 = 1,445$ Ом;

$$5) S_m = R'_2 / (R'^2_1 + X^2_k)^{1/2} = 1,445 / (1,445^2 + 6,572^2)^{1/2} = 0,215.$$

Задача 2. Визначити кратність пускового струму, пускового і максимального моментів, якщо: номінальна швидкість $n_H = 1440$ об/хв., $U_k = 0,2$, $\cos \varphi_k = 0,4$.

Розв'язок: 1) Якщо при заданій напрузі КЗ $U_k = 0,2$ струм номінальний, то повний опір $Z_k = 0,2$ в.о. і тому при повній напрузі $U = 1$ струм збільшиться в 5 разів, тобто кратність пускового струму складає 5;

2) Активний опір КЗ: $R_k = Z_k \cos \varphi_k = 0,08$ в.о., а індуктивний $X_k = 0,927$ в.о.

$$3) \text{ За умови } R_1 = R'_2 \quad s_m \approx \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{0,04}{0,183} = 0,218.$$

4) Номінальне ковзання складає 0,04 в.о.

$$5) \text{ За формулою Клосса } \frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{s/s_m + s_m/s} = \frac{2}{0,04/0,218 + 0,218/0,04} = 0,43,$$

або кратність максимального моменту складає 2,32.

6) аналогічно для кратності пускового моменту при ковзанні 1. Кратність складає 1,11.

Задача 3. Дано: $P_2 = 10$ кВт, $U_H = 220$, $n_H = 1440$ об/хв., $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 85\%$, $r_1 = 0,3$ Ом, $p_{ст} = 200$ Вт, схема з'єднання обмоток статора – трикутник. Визначити механічні втрати $p_{мех}$ и втрати в обмотці ротора $p_{м2}$

Розв'язок: 1) Фазний струм статора $I = P_2 / 3U_H \cos \varphi \eta = 10000 / 3 \cdot 220 \cdot 0,8 \cdot 0,85 = 22,3$ А;

2) Споживана потужність $P_1 = P_2 / \eta = 10 / 0,85 = 11,76$ кВт;

3) Номінальне ковзання $S_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04$;

4) Втрати в обмотці статора $p_{м1} = 3 I^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 22,3^2 \cdot 0,3 = 447,6$ Вт;

5) Електромагнітна потужність $P_{EM} = P_1 - p_{ст} - p_{м1} = 11760 - 200 - 447,6 = 11117,3$ Вт.

6) Втрати в обмотці ротора $p_{м2} = P_{EM} \cdot s = 11117,3 \cdot 0,04 = 444,7$ Вт.

7) $p_{мех} = (P_{EM} - P_2) - p_{м2} - 0,005 \cdot P_1 = 11117,3 - 10000 - 444,7 - 0,005 \cdot 11760 = 613,8$ Вт.

Задача 4. Дано: АД з даними $P_2 = 1000$ кВт, $U_H = 3,15$ кВ, $\cos \varphi = 0,91$, $\eta = 94\%$, схема з'єднання обмоток статора – зірка. АД запускається через автотрансформатор через відпайки 64%. Який буде пусковий струм при автотрансформаторному пуску, якщо при прямому пуску кратність пускового струму складає $k_i = 6$.

Розв'язок: 1) $I = P_2 / \sqrt{3} U_H \cos \varphi \eta = 214,5$ А;

2) $I_n = I_H \cdot k_i \cdot 0,64 = 825$ А.

Задача 5. Трифазний АД працює від мережі напругою 660 В при з'єднанні обмоток статора зіркою. При номінальному навантаженні він споживає з мережі потужність $P_1 = 16,7$ кВт при коефіцієнті потужності 0,87. Частота обертання $n_{\text{ном}} = 1470$ об/хв. Визначити ККД, якщо магнітні втрати $P_m = 265$ Вт, а механічні втрати $P_{\text{мех}} = 123$ Вт. Активний опір фази статора $r_{1.20} = 0,8$ Ом, а робоча температура 115 °С.

Розв'язок. 1) Струм в фазі обмотки статора:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_1 \cdot 10^3}{m_1 U_1 \cos \varphi_1} = \frac{16,7 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,87} = 16,8 \text{ А},$$

$$\text{де } U_1 = 660/\sqrt{3} = 380 \text{ В.}$$

3) Опір фази обмотки статора, приведений до робочої температури 115 °С:

$$r_1 = r_{1.20} [1 + \alpha(t_{\text{роб}} - 20)] = 0,8 [1 + 0,004(115 - 20)] = 1,1 \text{ Ом.}$$

4) Електричні втрати в обмотці статора:

$$P_{e1} = m_1 I_{1\text{ном}}^2 r_1 = 3 \cdot 16,8^2 \cdot 1,1 = 931 \text{ Вт.}$$

5) Електромагнітна потужність:

$$P_{\text{ем}} = P_1 - (P_m + P_{e1}) = 16,7 \cdot 10^3 - (265 + 931) = 15504 \text{ Вт.}$$

6) Номінальне ковзання: $s_{\text{ном}} =$

$$(n_1 - n_{\text{ном}})/n_1 = (1500 - 1470)/1500 = 0,02.$$

7) Електричні втрати в обмотці ротора:

$$P_{e2} = s_{\text{ном}} P_{\text{ем}} = 0,02 \cdot 15504 = 310 \text{ Вт.}$$

8) Додаткові втрати:

$$P_{\text{дод}} = 0,005 P_1 = 0,005 \cdot 16,7 \cdot 10^3 = 83 \text{ Вт.}$$

9) Сумарні втрати:

$$\sum P = P_m + P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{дод}} = 265 + 931 + 310 + 123 + 83 = 1712 \text{ Вт.}$$

10) ККД АД в номінальному режимі

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \sum P / P_1 = 1 - 1712 / (16,7 \cdot 10^3) = 0,898, \text{ або } 89,8\%.$$

Задача 6. Побудувати механічну $M^* = f(s)$ трьохфазного АД типу 4А160М4УЗ з номінальною потужністю 18,5 кВт, напругою 220/380 В, частотою обертання 1465 об/хв. Параметри схеми заміщення $r_1 = 0,263$ Ом, $x_1 = 0,521$ Ом, $r_2' = 0,158$ Ом, $x_2' = 0,892$ Ом. Перевантажувальна здатність АД дорівнює 2,3, кратність пускового моменту $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 1$.

Розв'язок. Для побудови механічної характеристики АД, визначаємо номінальний електромагнітний $M_{\text{ном}}$, пусковий $M_{\text{п}}$ і максимальний M_{max} моменти, а також

два проміжні значення моменту при ковзаннях $s > s_{кр}$.

1) Номінальне ковзання $s_{ном} = (1500 - 1465)/1500 = 0,023$.

2) Номінальний електромагнітний момент

$$M_{ном} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,158 \cdot 2}{2\pi 50 \cdot 0,023[(0,263 + 0,158/0,023)^2 + (0,521 + 0,829)^2]} = 121 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3) Пусковий момент $M_{п} = M_{ном} = 121 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

4) Максимальний момент $M_{max} = kM_{ном} = 2,3 \cdot 121 = 278 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

5) Критичне ковзання $s_{кр} = 0,158/(0,521 + 0,892) = 0,112$.

6) Електромагнітні моменти при ковзаннях $s = 0,2$; $s = 0,4$ и $s = 0,7$

$$M_{0,2} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,158 \cdot 2}{2\pi 50 \cdot 0,2[(0,263 + 0,158/0,2)^2 + (0,521 + 0,829)^2]} = 236 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$B_{0,4} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,158 \cdot 2}{2\pi 50 \cdot 0,4[(0,263 + 0,158/0,4)^2 + (0,521 + 0,829)^2]} = 150 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{0,7} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,158 \cdot 2}{2\pi 50 \cdot 0,7[(0,263 + 0,158/0,7)^2 + (0,521 + 0,829)^2]} = 93,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Результати обчислень наведено в таблиці 2. Механічна характеристика наведена на рис.2.

Таблиця 2

s	0	0,023	0,112	0,20	0,4	0,7	1,0
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	121	278	236	150	93,6	121
$M^* = M/M_{max}$	0	0,44	1,0	0,85	0,54	0,34	0,44

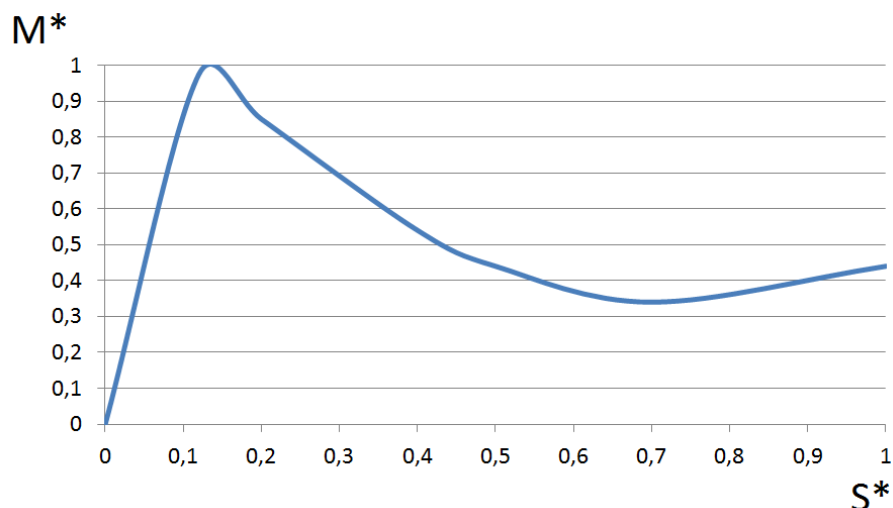


Рис. 2 – Механічна характеристика

Задача 7. Трифазний АД має наступні паспортні дані: $P_{ном}=3,0$ кВт, $U_{ном}=220/380$ В, $I_{1ном}=6,3$ А, $n_{ном}=1430$ об/хв. Активний опір фази обмотки статора при робочій температурі $r_1=1,7$ Ом. Параметри х.х.: $I_{0ном}=1,83$ А, $P_{0ном}=300$ Вт, $P'_{0ном}=283$ Вт, $P_{мех}=200$ Вт, $\cos \varphi_{0ном}=0,24$. Фази обмотки статора з'єднані зіркою. Параметри к.з.: $P_{кном}=418$ Вт, $U_{кном}=59,5$ В, $I_{кном}=6,3$ А, $\cos \varphi_{кном}=0,372$. Побудувати робочі характеристики АД і визначити його перевантажувальну здатність.

Розв'язок. 1) Активна і реактивна складові струму х. х.

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_{0ном} = 1,83 \cdot 0,24 = 0,44 \text{ А},$$

$$I_{0p} = I_0 \sin \varphi_{0ном} = 1,83 \cdot 0,97 = 1,77 \text{ А}.$$

2) Повний опір к. з. $z_k = U_{кном} / I_{кном} = 59,5 / 6,3 = 9,45 \text{ Ом},$

3) Активна і реактивна складові повного опору

$$r_k = z_k \cos \varphi_{к.ном} = 9,45 \cdot 0,372 = 3,5 \text{ Ом},$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{9,45^2 - 3,5^2} = 8,8 \text{ Ом}.$$

4) Приведений активний опір ротора

$$r_2' = r_k - r_1 = 3,5 - 1,7 = 1,8 \text{ Ом}.$$

5) Критичне ковзання

$$s_{кр} = r_2' / x_k = 1,8 / 8,8 = 0,2.$$

6) Номінальне ковзання

$$s_{ном} = (n_1 - n_{2ном}) / n_1 = (1500 - 1430) / 1500 = 0,046.$$

7) Магнітні втрати

$$P_m = P_n' - P_{мех} = 283 - 200 = 83 \text{ Вт}$$

Приймаємо наступні значення ковзання: 0,01; 0,02; 0,03; 0,046; 0,06 і 0,2.

Перевантажувальна здатність АД: $\lambda = M_{мах} / M_{ном} = 38,7 / 21,4 = 1,81$.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.

Таблица 3

Формула \ Ковзання s	0,01	0,02	0,03	0,046	0,06	0,2
$r_2' / s, \text{ Ом}$	180	90	60	39,1	30	10,1
$r_{\text{эк}} = r_1 + r_2' / s, \text{ Ом}$	181,7	91,7	61,7	40,8	31,7	11,8
$z_{\text{эк}} = \sqrt{r_{\text{эк}}^2 + x_{\text{к}}^2}, \text{ Ом}$	182	92	62,5	42	33,2	15,5
$\cos \varphi_2 = r_{\text{эк}} / z_{\text{эк}}$	0,998	0,996	0,987	0,971	0,955	0,760
$I_2' = U_1 / z_{\text{эк}}, \text{ А}$	1,21	2,39	3,52	5,24	6,63	14,2
$I_{2\text{н}} = I_2' \cos \varphi_2, \text{ А}$	1,21	2,38	3,47	5,09	6,33	10,7
$I_{2\text{р}}' = I_2' \sin \varphi_2, \text{ А}$	0,08	0,19	0,57	0,125	0,95	9,20
$I_{1\text{а}} = I_{0\text{а}} + I_{2\text{а}}', \text{ А}$	1,65	2,82	3,91	5,54	6,77	11,1
$I_{1\text{р}} = I_{0\text{р}} + I_{2\text{р}}', \text{ А}$	1,85	1,96	2,34	3,02	3,72	10,9
$I_1 = \sqrt{I_{1\text{а}}^2 + I_{1\text{р}}^2}, \text{ А}$	2,48	3,43	4,55	6,30	7,7	15,5
$\cos \varphi_1 = I_{1\text{а}} / I_1$	0,66	0,82	0,86	0,88	0,88	0,71
$P_1 = m_1 U_1 I_{1\text{а}}, \text{ Вт}$	1089	1861	2580	3652	4468	7326
$P_{\text{ел1}} = m_1 I_1^2 r_1, \text{ Вт}$	31,0	60,0	105	200	302	1225
$P_{\text{ем}} = P_1 - P_{\text{ел1}} - P_{\text{м}}, \text{ Вт}$	975	1718	2392	3369	4083	6080
$M = P_{\text{ем}} / \omega_1, \text{ Н} \cdot \text{м}$	6,2	10,9	15,3	21,4	26	38,7
$P_{\text{ел2}} = s P_{\text{ем}}, \text{ Вт}$	10	34	72	151	245	-
$P_{\text{доо}}' = (I_1 / I_{1\text{ном}})^2 P_{\text{доо.ном.}}, \text{ Вт}$	2,7	5,2	9,4	18	26	-
$P_2 = P_{\text{ем}} - P_{\text{ел2}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{доо}}', \text{ Вт}$	762	1479	2110	3000	3612	-
$\eta = P_2 / P_1$	0,7	0,79	0,82	0,82	0,81	-
$n_2 = n_1 (1 - s), \text{ об} / \text{хв}$	1485	1470	1455	1430	1410	-
$M_2 = 9,55 P_2 / n_2, \text{ Н} \cdot \text{м}$	4,9	9,6	13,8	20	24,5	-

III. КОНТРОЛЬНІ ЗАДАЧІ

1 Намагнічувальні сили і магнітне поле в асинхронних машинах

1. Визначити МРС статора на один полюс асинхронної машини при частоті мережі живлення $f = 50$ Гц. Схема з'єднання обмоток статора – зірка, $a=1$. Дані асинхронної машини наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

№ п/п	P_n кВт	U_n В	n_n об/хв	η_n %	$\cos \varphi$ -	Z_l -	y_l -	W_k -
1	200	6000	730	95	0,9	72	7	10
2	100	500	2960	93	0,9	48	15	6
3	55	380	2940	90	0,92	36	11	7
4	14	380	730	89,5	0,83	54	6	11
5	10	500	725	87	0,8	54	6	16
6	7,5	220	1460	88,5	0,87	36	7	13
7	3	380	960	83	0,78	36	7	41
8	3	500	2880	84,5	0,89	24	8	34
9	1,1	220	1410	78,0	0,8	24	7	92
10	0,4	127	910	66	0,65	36	7	69

2. Визначити МРС обмотки статора на пару полюсів асинхронної машини в режимі холостого ходу, що має наступні дані: $P = 10$ кВт, $U = 380$ В, $n = 960$ об/хв, $\eta = 90\%$, $\cos \varphi = 0,8$, $S_n = 20$, $b = 0,8$, $Z = 54$. Частота мережі живлення $f = 50$ Гц, $I_0 = 40\% I_n$.
3. Визначити величину магнітної індукції в повітряному проміжку асинхронної машини, що має наступні дані: $Z = 54$, $S_n = 20$, $m = 3$, $y = 6$, $n_l = 1000$ об/хв, $\delta = 0,5$ мм, якщо струм холостого ходу $I_0 = 5$ А. Падінням магнітного потенціалу в сталі знехтувати.
4. Чотириполюсний АД $U = 380$ В, $f = 50$ Гц має на статорі $Z_l = 36$, $a = 2$, $W_k = 30$, з'єднання фаз – трикутник. Визначити струм холостого ходу, якщо $\delta = 0,05$ см, $K_q = 1,05$, діаметр розточки $D = 20$ см, $l = 15$ см (магнітним опором сталі знехтувати).
5. Шестиполюсний асинхронний двигун має: $Z_l = 36$, $\delta = 0,05$ см, $K_q = 1,1$, $y = 5$, $W_l = 120$, з'єднання фаз – трикутник. Визначити струм намагнічування, що

- забезпечує амплітуду магнітної індукції в повітряному проміжку $B_\delta = 0,68$ Тл, вважаючи коефіцієнт насичення магнітного кола струму $\kappa_n=1,2$.
6. Двополюсний асинхронний двигун з напругою $U_\phi=380$ В перемотаний на чотирьохполюсний з напругою $U_\phi=220$ В. Визначити зміну струму намагнічування при незмінності індукції в повітряному проміжку. Знехтувати падінням напруги в обмотці статора і магнітним опором ярма.
 7. Визначити обмоткові коефіцієнти першої, третьої та п'ятої гармонік для асинхронної машини, що має наступні дані: $Z=48$, $n_1=750$ об/хв, $y=5$, $m=3$.
 8. Визначити першу, третю і п'яту гармоніки ЕРС витка обмотки для асинхронної машини, що має наступні дані: $n_1=750$ об/хв, $D=0,5$, $l=0,3$, $\beta=0,8$, якщо гармоніки магнітної індукції відповідно дорівнюють $B_1=1$ Тл, $B_3=0,2$ Тл, $B_5=0,1$ Тл.
 9. Для асинхронної машини при частоті мережі $f=50$ Гц, визначити повну ЕРС котушки і гармонійні складові E_1 , E_3 , E_5 , якщо відомо: $D=0,3$, $l=0,2$, $n_1=1000$ об/хв, $b=0,9$, $W_k=20$, амплітуди гармонік магнітної індукції відповідно дорівнюють $B_1=0,8$ Тл, $B_3=0,2$ Тл, $B_5=0,15$ Тл.
 10. Визначити фазну і лінійну ЕРС асинхронної машини, якщо відомо: $n_1=500$ об/хв, $m=3$, $S_n=30$, $y=8$, $Z=108$, схема з'єднання – зірка, амплітуди гармонійних складових магнітного потоку $\Phi_1=10^{-4}$ Вб, $\Phi_3=2 \cdot 10^{-5}$ Вб, $\Phi_5=10^{-5}$ Вб.
 11. Визначити гармонійні складові ЕРС E_1 , E_3 , E_5 в провіднику обмотки машини змінного струму при $l=1$ м, $D=0,5$ м, $n_1=600$ об/хв, якщо магнітне поле вздовж розточки розподілено по прямокутнику з висотою $B=0,5$ Тл.
 12. Визначити гармонійний склад ЕРС (E_1 і E_3) провідника обмотки статора, якщо активна довжина машини l , D - діаметр розточки, n_1 – швидкість обертання магнітного поля, якщо магнітне поле має розподіл згідно рис.1. Частота мережі живлення $f=50$ Гц. Дані наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D, м	0,5	0,545	0,25	0,705	0,75	0,605	0,728	0,95	0,64	0,75
l, м	0,5	0,29	0,2	0,41	0,29	0,33	0,41	0,33	0,41	0,33
n, об/хв	1000	1500	750	1000	1500	3000	750	600	1500	1000
$\alpha=bp/\tau$	2/3	1	1	0,5	1	2/3	0,5	1	2/3	0,5
B, Тл	0,8	0,6	1	0,65	0,8	0,7	0,65	0,6	0,7	0,8

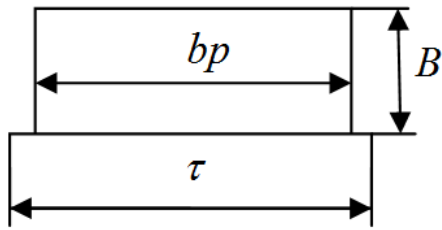


Рис.1

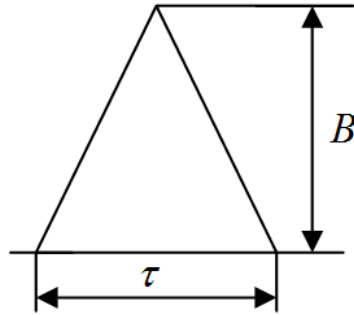


Рис.2

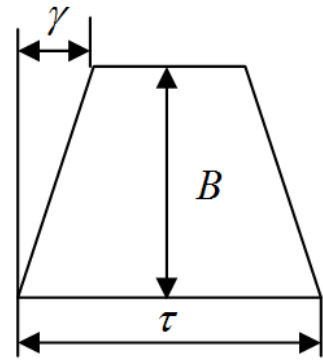


Рис.3

13. Вирішити завдання 12 у випадку розподілу магнітного поля уздовж полюсного поділу згідно з рис.2. Додатково визначити діюче значення ЕРС E .
14. Вирішити завдання 12 у випадку розподілу магнітного поля уздовж полюсного поділу згідно з рис.3. Замість значення α використовувати величину γ у таблиці 1.3 відповідно за варіантами.

Таблиця 1.3

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γ	0,8	0,75	0,7	0,65	0,8	0,75	0,7	0,65	0,8	0,75	0,7

15. Визначити фазну і лінійну ЕРС асинхронної машини при $Z=54$, $n_l=1000$ об/хв, $m=3$, $S_n=40$, $y=7$, з'єднання обмоток – зірка, $a=1$. Амплітуди гармонік магнітного потоку становлять $\Phi_1=1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$, $\Phi_3=2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$, $\Phi_5=2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$.

2 ЕРС і струми асинхронної машини при нерухомому і обертовому роторі

1. В асинхронному двигуні з фазним ротором за паспортом напруга на кільцях при $S=1$ становить 200 В. Визначити вторинну ЕРС при швидкостях: 500 об/хв, 950 об/хв і 1500 об/хв, якщо частота мережі живлення $f=50$ Гц, число пар полюсів $p=3$.
2. Паспортні дані асинхронних двигунів приведені в таблиці 2.1. Визначити номінальні лінійні та фазні струми, номінальний момент, ковзання і частоту струмів в роторі, якщо частота мережі $f=50$ Гц.

Таблиця 2.1

№ п/п	P_n кВт	U_n В	η %	$\cos \varphi$ -	n_n об/хв	Схема з'єд- нання
1	50	380	90	0,88	2940	Трикутник
2	100	380	91,5	0,92	2960	Зірка
3	30	500	91	0,88	730	Зірка
4	30	220	91	0,91	1460	Трикутник
5	17	380	89	0,87	970	Зірка
6	7,5	220	85	0,78	725	Трикутник
7	0,8	127	80	0,81	1400	Трикутник

- Для асинхронного двигуна відомо: $\Phi_1=7,8 \cdot 10^{-3}$ Вб, $W_1=128$, $W_2=24$, $K_{об1}=0,93$, $K_{об2}=0,96$, $2p=4$, $n_n=1440$ об/хв. Визначити E_1 , E_{2s} і коефіцієнт приведення ЕРС K_e .
- Визначити ЕРС обмотки статора асинхронного двигуна, якщо напруга мережі 220 В, з'єднання фаз - трикутник, $P=40$ кВт, $\eta=92\%$, $\cos \varphi =0,86$, $Z_1=jX_{\sigma 1}=0,5$ Ом.
- Визначити мінімальну і максимальну напругу на виході потенціал-регулятора, якщо $U_1=380$ В, $W=200$, $K_{об1}=0,902$, $W_2=180$, $K_{об2}=0,95$.
- Визначити ЕРС, індуковану у фазі ротора асинхронного двигуна при нерухомому роторі і при його обертанні з ковзанням $S=4\%$. Число витків у фазі ротора $W_2=30$, $K_{об2}=0,95$, амплітуда магнітного потоку $\Phi=45 \cdot 10^{-3}$ Вб, частота мережі $f=50$ Гц.
- ЕРС між кільцями ротора нерухомого чотирьохполусного асинхронного двигуна $E_2=200$ В. Визначити величину ЕРС ротора і її частоту при обертанні проти поля статора зі швидкістю $n=1500$ об/хв. Частота мережі $f=50$ Гц.
- Для двополусного асинхронного двигуна визначити ковзання і швидкість обертання МРС ротора відносно ротора, якщо частота мережі $f=50$ Гц, а швидкість ротора $n=2850$ об/хв.
- Параметри ротора трифазного асинхронного двигуна становлять $r_2=0,2$ Ом, $x_2=0,4$ Ом. ЕРС між кільцями нерухомого ротора $E_2=155$ В. Визначити струм, що протікає в роторі, якщо він обертається з ковзанням $S=0,2$. Фази ротора з'єднані в зірку.
- Для трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначити струм в сегменті короткозамикаючого кільця при нерухомому роторі, якщо відомо: $I_{1\phi}=40$ А, $W_1=240$, $Z_1=36$, $y=\tau$, $2p=4$, $Z_2=44$. Потокм взаємоіндукції знехтувати.

11. Відомі дані досліджу короткого замикання асинхронного двигуна: $U_{кф}=70$ В, $I_{кф}=70$ А, $\cos\varphi_k=0,35$ і обмоточні дані $Z_1=72$, $S_{n1}=10$, $y_1=8$, $Z_2=48$, $S_{n2}=4$, $y_2=5$, $2p=8$, $r_1=0,15$ Ом, $x_1=0,5$ Ом. Визначити r_2 і x_2 .
12. При збільшенні навантаження на асинхронний двигун фазний струм статора збільшився з 14,1 А до 18 А, а $\cos\varphi$ з 0,707 до 0,866. Визначити зміну струму в стержні короткозамкненого ротора, якщо вважати, що зміною основного магнітного потоку можна знехтувати. Обмоточні дані двигуна: $Z_1=24$, $m=3$, $S_{n1}=20$, $a=1$, $2p=4$, $\beta=0,9$, $Z_2=54$.
13. Асинхронний двигун живиться від мережі $f_1=50$ Гц і обертається зі швидкістю $n=1455$ об/хв, частота струму ротора $f_2=1,5$ Гц. Визначити ковзання двигуна і число пар полюсів обмотки статора.
14. Визначити частоту обертання магнітного поля і номінальну частоту обертання ротора двигунів, що мають наступні дані, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

№ п/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f	Гц	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60
p	-	2	1	8	10	4	6	2	1	1	4
S	в.о.	0,04	0,03	0,08	0,1	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,06

15. Визначити ковзання асинхронних двигунів з фазними роторами, якщо стрілка амперметра магнітоелектричної системи, включеного в електричне коло ротора, робить ν повних коливань за t сек. Дані наведені в таблиці 2.3. Частота мережі живлення $f_1 = 50$ Гц.

Таблиця 2.3

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ν	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
t	10	10	10	10	5	5	5	5	20	20	20	20

3. Електромагнітні моменти асинхронної машини

1. В таблиці 3.1 наведені каталогові дані асинхронних двигунів. Визначити максимальний і пусковий моменти, а також пусковий струм.

Таблиця 3.1

№ п/п	P_n кВт	U_n В	η_n %	$\cos\varphi$ -	n_n об/хв	K_I	K_M	K_n
1	100	660	90	0,92	1480	6,5	2,5	1,8
2	160	3000	90,5	0,77	490	4,6	2,3	1,0
3	1000	6000	94,4	0,88	985	6,3	2,4	1,2
4	630	3000	94	0,89	1480	5,3	2,2	0,9
5	320	3000	93	0,85	737	5	2,2	0,9
6	10	380	87,6	0,87	970	5,25	2,5	1,3
7	10	380	89,4	0,905	2945	7,1	3,0	1,4
8	10	220	90,2	0,89	1465	5,7	2,3	1,3

2. Відомі паспортні дані асинхронних двигунів (табл. 3.2). Визначити пусковий момент, якщо відомо ковзання, при якому електромагнітний момент досягає максимального значення.

Таблиця 3.2

№ п/п	P_n кВт	U_n В	n_n об/хв	η %	$\cos\varphi$ -	S_m в.о.
1	5	220	950	90	0,8	0,2
2	1,1	380	1410	78	0,8	0,28
3	2,2	220	950	80	0,77	0,26
4	3,0	380	720	81,5	0,7	0,24
5	10	220	1460	89	0,88	0,2
6	17	500	1450	89	0,89	0,17
7	22	220	2900	88	0,9	0,19
8	40	500	2940	89	0,91	0,16

3. Визначити ковзання та електромагнітний момент трифазного чотирьохполюсного асинхронного двигуна з фазним ротором, якщо $P_{em}=7 \text{ кВт}$, $I_2=60 \text{ А}$, $r_2=0,02 \text{ Ом}$, $m=3$.

4. Визначити критичне ковзання асинхронного двигуна, якщо з досліду короткого замикання відомо: $U_K=1740\text{ В}$, $I_{K}=140\text{ А}$, $P_{K}=170\text{ кВт}$. З'єднання фаз статора – зірка. Прийняти $r_1=r'_2$.
5. Визначити кратність максимального моменту трифазного асинхронного двигуна, якщо відомо, що $M_n=M_H$, $I_n=6\cdot I_H$, $\cos\varphi=0,4$, $2p=6$. Визначити роботу швидкість машини.
6. Для трифазного чотирьохполюсного асинхронного двигуна визначити максимальний і пусковий моменти, критичне ковзання і пусковий струм, якщо відомо: $U_K=104\text{ В}$, $I_K=I_H=80\text{ А}$, $\cos\varphi=0,3$, $U_H=380\text{ В}$, $r_1=0,5\cdot r'_2$, схема з'єднання обмоток - зірка.
7. Для трифазного асинхронного двигуна визначити кратність пускового струму, пускового та максимального моментів, якщо відомо: $U_K=20\%$, $\cos\varphi=0,4$, $n=1440\text{ об/хв}$.
8. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором $P_H=300\text{ кВт}$, $U=3,0\text{ кВ}$, $I_H=68\text{ А}$, $n_H=1475\text{ об/хв}$, $r_1=0,332\text{ Ом}$, схема з'єднання – зірка, в досліді короткого замикання має параметри: $z_K=4,36\text{ Ом}$, $r_K=1,33\text{ Ом}$, $X_K=4,15\text{ Ом}$. Визначити кратність пускового моменту, якщо кратність пускового струму ротора становить $I_{2H}/I_{2H}=5,8$.
9. Для трифазного асинхронного двигуна визначити пусковий і максимальний момент, а також кратність пускового струму, якщо відомо $U_H=380\text{ В}$, $n_H=950\text{ об/хв}$, схема з'єднання - зірка, дані досліду короткого замикання: $U_K=173\text{ В}$, $I_K=1,5\cdot I_H=100\text{ А}$, $\cos\varphi_K=0,35$, $r_1=r'_2$.
10. Трифазний шестиполісний асинхронний двигун включається в мережу з напругою: $U_\phi=220\text{ В}$, і частотою $f_1=50\text{ Гц}$. Визначити величину пускового струму в статорі і роторі і величину пускового моменту, якщо $r_2=0,05\text{ Ом}$, $Z_K=6,3\text{ Ом}$, коефіцієнт трансформації по струму $K_I=5$ і $m_2=3$.
11. Для трифазного асинхронного двигуна відомо $I_K=7\cdot I_H$, $\cos\varphi_K=0,3$, $n_H=480\text{ об/хв}$. Визначити кратності максимального і пускового моментів.
12. Визначити, чи можлива робота двигуна з моментом опору рівним $0,7\cdot M_H$, при зниженні напруги мережі на 30% . Яке зниження напруги є допустимим, при якому ще можлива робота двигуна? Перевантажувальна здатність при номінальній напрузі складає $K_M=1,9$.
13. Чотирьохполісний асинхронний двигун, що живиться від мережі частотою $f_1=50\text{ Гц}$, розвиває корисний момент $M_2=70\text{ Н}\cdot\text{м}$ при обертанні ротора зі швидкістю $n=1420\text{ об/хв}$. Визначити корисну потужність двигуна і його ковзання.
14. Визначити пусковий момент асинхронного двигуна, якщо втрати в електричному колі ротора при пуску складають 5 кВт , а частота мережі живлення $f_1=50\text{ Гц}$, номінальна швидкість обертання ротора $n_H=960\text{ об/хв}$.

15. Побудувати механічну характеристику асинхронного двигуна при зміні ковзання від 0 до 1. АД має наступні дані: $P_H=70 \text{ кВт}$, $n_H=1460 \text{ об/хв}$, перевантажувальна здатність $K_M=2,1$. Визначити номінальний і максимальний моменти.

4. Енергетична діаграма і робочі характеристики асинхронного двигуна

1. Номінальна потужність АД $P_H=100 \text{ кВт}$, при холостому ході потужність втрат двигуна $P_0=5,15 \text{ кВт}$, а при короткому замиканні (проводиться при номінальному струмі) $P_K=5,55 \text{ кВт}$. Визначити ККД в номінальному режимі.
2. Для АД $P_H=100 \text{ кВт}$, $U_H=3000 \text{ В}$, $I_H=26 \text{ А}$, $n_H=580 \text{ об/хв}$, відомі результати дослідів холостого ходу (табл. 4.1) і дослідів безпосереднього навантаження (табл. 4.2). Визначити ККД і побудувати криву залежності $\eta = f(P_2)$. Користуючись цією кривою знайти значення ККД в номінальному режимі.

Таблиця 4.1

№ п/п	U_0	I_0	P_0	$\cos \varphi_0$
	В	А	кВт	-
1	3000	13,85	5,15	0,083
2	2500	10,5	3,8	0,09
3	2000	8,1	2,75	0,0982
4	1500	6,0	1,925	0,124
5	1000	4,0	1,2	0,173

Таблиця 4-2

№ п/п	1	2	3	4	5
$I_l, \text{ А}$	33,8	26,65	22,70	18,20	13,6
$P_l, \text{ кВт}$	134	104	81,8	54	13
$S, \%$	4,4	3,43	2,7	1,8	0,4
$\cos \varphi_0$	0,772	0,742	0,695	0,571	0,186

3. Асинхронний двигун $P_H=16 \text{ кВт}$, $n_H=685 \text{ об/хв}$ включений в мережу $U=220 \text{ В}$ при з'єднанні фаз обмотки статора – трикутник і навантажений моментом $M=0,3 \cdot M_H$. Визначити коефіцієнт потужності двигуна в цьому

- режимі, якщо параметри Г-подібної схеми заміщення наступні: $r_0=0,75$, $x_0=10\text{ Ом}$, $R_1=0,27\text{ Ом}$, $R_2=0,64\text{ Ом}$, $x_K=0,94\text{ Ом}$.
4. Як зміниться коефіцієнт потужності двигуна в попередній задачі, якщо при тому ж моменті на валу, обмотку статора з'єднати зіркою.
 5. Асинхронний чотирьохполюсний двигун з фазним ротором працює в режимі противключення зі швидкістю обертання ротора $n=375\text{ об/хв}$ і розвиває гальмівний момент $M=387\text{ Нм}$. Визначити потужність двигуна: на валу P_2 , електромагнітну P_{EM} , споживану P_1 , втрачену в електричному колі ротора (в обмотці і в реостаті) ΔP_2 , якщо втрати в статорі $P_{MI}+P_{CT}=3,6\text{ кВт}$. Механічними втратами і втратами в сталі ротора знехтувати.
 6. Асинхронна машина з числом пар полюсів $p=3$ з фазним ротором з включеним в коло ротора опором працює в генераторному режимі $n=1250\text{ об/хв}$ і розвиває гальмівний момент 245 Нм . Визначити потужності: на валу двигуна P_2 , електромагнітну P_{EM} , потужність що віддається машиною в мережу P_1 , потужність втрат в електричному колі ротора (в обмотці і в реостаті) ΔP_2 і ковзання S , якщо втрати потужності в обмотці і сердечнику статора $P_{MI}+P_{CT}=3\text{ кВт}$. Знехтувати механічними втратами.
 7. За паспортними даними асинхронного двигуна: $P_H=1000\text{ кВт}$, $U_H=3\text{ кВ}$, $\eta = 93\%$, $\cos\varphi = 0,92$, $n_H=940\text{ об/хв}$, визначити: номінальний струм, момент, ковзання, частоту струму ротора, сумарні втрати в обмотках ротора і статора, якщо відомі втрати холостого ходу при номінальній напрузі $P_0=40\text{ кВт}$. Втратами від струму холостого ходу і додатковими втратами знехтувати. Виконати інженерну оцінку даного припущення.
 8. За паспортними даними асинхронного двигуна, наведеними у таблиці 4.3, визначити втрати в роторі і механічні втрати, якщо відомо опір фази статора і втрати в сталі.
 9. Відомі наступні паспортні дані асинхронного двигуна $P_H=1000\text{ кВт}$, $I_H=178,5\text{ А}$, $r_1=0,0154\text{ Ом}$, $n_H=1460\text{ об/хв}$, схема з'єднання – зірка. В досліді холостого ходу при номінальній напрузі виміряні: $P_0=2008\text{ Вт}$, $I_0=42,7\text{ А}$ і виділені механічні втрати $P_{MECH}=700\text{ Вт}$. Визначити номінальний ККД двигуна.

Таблиця 4.3

№ п/п	P_H кВт	U_H В	n_H об/хв	η %	$\cos\varphi$ -	P_{CT} Вт	r_l Ом	Схема з'єд- нання
1	10	220	1440	85	0,8	200	0,3	трикутник
2	14	380	730	89,5	0,83	280	0,2	зірка
3	75	500	1470	92,5	0,92	900	0,12	зірка
4	40	220	585	90,5	0,82	700	0,17	трикутник
5	2,2	380	950	81,0	0,77	80	0,9	зірка
6	5,5	220	730	85	0,72	130	0,55	трикутник
7	22	380	1460	90	0,9	320	0,15	зірка

10. Трифазний асинхронний двигун споживає з мережі потужність $P_I=100$ кВт. Електромагнітна потужність $P_{EM}=94$ кВт, ковзання $S=0,02$. Визначити ККД двигуна, прийнявши механічні втрати $P_{MEH}=0,62$ кВт.
11. Який необхідно включити опір в коло ротора асинхронного двигуна, щоб струми і потужність, споживані статором при $S = 1$ були такими ж, як і в номінальному режимі: $P_H=15$ кВт, $U_H=220$ В, $I_H=48$ А, $n_H=1450$ об/хв, $r_2=0,08$ Ом.
12. Трифазний асинхронний двигун при напрузі $U=380$ В розвиває на валу корисний момент M_2 , обертаючись із ковзанням S і споживаючи з мережі струм I_l . За даними таблиці 4.4 визначити P_2 , і ККД η , якщо відома споживана потужність P_I .

Таблиця 4.4

№ п/п	P_I кВт	M_2 Нм	I_l А	S %
1	44,4	260	74	1,63
2	81,3	784,8	139,5	1,85
3	16	182,8	32,1	3,3
4	23,5	138,3	40,7	7,8
5	34,4	301,2	42,5	11,1
6	60	356,1	102	1,6

13. Асинхронний трифазний двигун при напрузі мережі $U=380$ В розвиває на валу номінальну потужність P_H при обертанні ротора зі швидкістю n_H і споживає з мережі струм I_H при заданому коефіцієнті потужності $\cos\varphi$. При холостому ході двигун споживає з мережі потужність P_0 при струмі I_0 . Активний опір обмотки статора r_l виміряний при температурі $t=15^\circ\text{C}$.

Знаючи механічні втрати потужності P_{MEH} при холостому ході, визначити за даними таблиці 4.5 для номінального режиму втрати потужності в міді статора P_{M1} і ротора P_{M2} , втрати в сталі P_{CT} , додаткові втрати P_D і ККД двигуна.

Таблиця 4.5

№	P_H	I_H	n_n	r_l	$\cos\varphi$	P_0	I_0	P_{mex}
п/п	кВт	А	об/хв	Ом	-	Вт	А	Вт
1	10	18,2	2920	0,326	0,913	325	5,04	130
2	7	11,02	1450	0,52	0,862	292	4,47	90
3	100	178,4	1460	0,0154	0,91	2008	42,7	700
4	75	141,0	960	0,036	0,882	1269	30,8	200
5	7	13,8	2910	0,58	0,913	396	4,07	180

14. Користуючись Г-подібною схемою заміщення, розрахувати і побудувати робочі характеристики асинхронних двигунів P_l , I_l , M , n , η , $\cos\varphi = f(P_2)$, задаючись зміною ковзання в межах 0 до $1,5 \cdot S_H$. Дані двигунів наведені в таблиці 4.6. Схема з'єднання обмоток статора – зірка.

Таблиця 4.6

№	P_H	U_H	n_n	r_{115°	r'_{215°	x_1	x'_2	I_0	P_0	P_{mex}
п/п	кВт	В	об/хв	Ом	Ом	Ом	Ом	А	Вт	Вт
1	7	380	2910	0,6	0,41	1,3	1,4	4,07	396	180
2	40	380	730	0,06	0,0445	0,302	0,52	27	1259	130
3	28	380	2960	0,074	0,0775	0,38	0,44	10,5	757	350
4	55	380	960	0,056	0,0406	0,26	0,376	26,2	1318	210
5	20	380	2950	0,11	0,098	0,484	0,52	9,96	705	300
6	75	380	1460	0,037	0,031	0,2	0,246	38	1546	450

15. За даними таблиці 4.7 для асинхронних двигунів з фазним ротором побудувати уточнену кругову діаграму і робочі характеристики, прийнявши параметри короткого замикання постійними. Дані дослідів холостого ходу і короткого замикання відомі при номінальній напрузі. Схема з'єднання обмоток статора – зірка

Таблиця 4.7

№ п/п	P_H кВт	U_H В	n_H об/хв	R_{115° Ом	I_0 А	P_0 кВт	I_K А	P_K кВт	$P_{мех}$ кВт
1	7	380	2910	0,6	4,07	0,396	71	26	0,18
2	400	6000	1480	1,13	12,1	13,3	217	340	3
3	320	3000	980	0,364	20,2	9,55	280	204	2
4	500	6000	1485	0,72	15,9	16,1	302	409	7
5	250	3000	735	0,43	20,3	7,6	206	129	1,1
6	630	6000	1485	0,53	18,0	18,0	380	515	7,5
7	200	3000	490	0,52	7,65	7,65	190	133	0,8

5 Пуск в хід, регулювання швидкості і гальмування асинхронного двигуна

1. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, паспортні дані якого: $P_H=1000$ кВт, $U_H=3,15$ кВ, $\eta = 94\%$, $\cos\varphi = 0,91$, має автотрансформаторний пуск через відпайки 64%. Який пусковий струм споживає двигун, якщо при прямому пуску кратність пускового струму $K_I=6$.
2. Паспорт асинхронного двигуна $P_H=800$ кВт, $U_H=3,15$ кВ, $\eta = 95\%$, $\cos\varphi = 0,9$, $n_H=1470$ об/хв, схема з'єднання – зірка. В досліді короткого замикання виміряно: $U_{IK}=380$ В, $I_{IK}=140$ А. Визначити максимально допустимий опір реактора для здійснення пуску механізму з моментом опору $0,3 \cdot M_H$, якщо кратність пускового моменту при прямому пуску $1,2 \cdot M_H$. Визначити кратність пускового струму при прямому і реакторному пусках. Активними параметрами знехтувати.
3. Паспортні дані асинхронного двигуна: $P_H=800$ кВт, $U_H=6,3$ кВ, $\eta = 95\%$, $\cos\varphi = 0,91$, схема з'єднання – зірка. В досліді короткого замикання виміряно: $U_{IK}=1470$ В, $I_{IK}=140$ А. Визначити опір реактора при реакторному пуску двигуна, щоб кратність пускового струму не перевищувала $K_I=2$. Активними параметрами короткого замикання знехтувати.
4. Який опір необхідно включити в коло роторної обмотки асинхронного двигуна з фазним ротором для того, щоб $M_n = M_m$, якщо відомо $U_{кф} = 40$ В, $I_{кф} = I_H = 20$ А, $\cos\varphi_K = 0,4$, $K_e = 2$, $U_{нф} = 220$ В. Визначити пусковий струм і його кратність.

5. Визначити кратність пускового моменту шестиполусного трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при пуску через реактор, якщо $M_H = 70 \text{ Нм}$, $I_{1H} = 11 \text{ А}$, $r_2' = 0,5 \text{ Ом}$, кратність пускового струму при пуску через реактор $K_I = 3$, частота мережі живлення $f = 50 \text{ Гц}$. Струмом намагнічування при пуску знехтувати.
6. Визначити величину додаткового опору в електричному колі ротора асинхронного двигуна, що забезпечує максимальний пусковий момент, якщо відомо, що $r_1 = 0,4 \text{ Ом}$, $r_2' = 0,5 \text{ Ом}$, $X_k = 4 \text{ Ом}$, коефіцієнт трансформації $k = 2$.
7. Трифазний чотирьохполусний двигун в номінальному режимі розвиває електромагнітний момент $M_{EM} = 60 \text{ Нм}$ при струмі ротора $I_2 = 60 \text{ А}$; активний опір фази ротора $r_2 = 0,02 \text{ Ом}$. Визначити швидкість обертання ротора двигуна при введенні в коло ротора додаткового опору $r_d = 0,08 \text{ Ом}$, вважаючи момент навантаження двигуна незалежним від швидкості обертання.
8. Визначити опір, який необхідно включити в ротор чотирьохполусного асинхронного двигуна, що працює при номінальному навантаженні з ковзанням $S_H = 0,03$, щоб при тому ж навантаженні швидкість його знизилась до $n = 900 \text{ об/хв}$. Опір ротора $r_2 = 0,06 \text{ Ом}$, частота мережі живлення $f = 50 \text{ Гц}$.
9. Для асинхронних двигунів, дані яких наведені у таблиці 5.1, визначити опір реостата, який необхідно включити в електричне коло ротора для отримання при номінальному моменті заданої швидкості. Прийняти $r_1 = r_2'$.

Таблиця 5.1

№ п/п	P_H	U_H	η_H	$\cos \varphi_H$	n_H	Схема з'єд- нання	n	k	P_r при $I_K=I_H$
	кВт	В	%	-	об/хв		об/хв	-	Вт
1	40	380	88	0,88	710	Зірка	300	2	2000
2	14	220	89,5	0,83	730	Трикут- ник	410	2,5	700
3	55	500	92,5	0,92	1460	Зірка	1000	0,8	2700
4	100	380	91,5	0,92	2960	Зірка	2100	0,5	4700
5	400	3000	92	0,91	2980	Зірка	2300	1,4	18000
6	13	220	88,5	0,9	2920	Трикут- ник	1800	1,7	600
7	10	500	88	0,89	970	Зірка	520	1,2	470
8	75	380	92	0,9	2920	Зірка	1600	3	3000

10. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю $P_H = 2000$ кВт, $U_H = 6,3$ кВ, $\eta_H = 95\%$, $\cos \varphi_H = 0.9$, $n_H = 2940$ об/хв має автотрансформаторний пуск через відпайки 36%. Який пусковий момент розвиває при цьому двигун і яка його кратність, якщо кратність пускового моменту при прямому пуску $K_M = 0,8$.
11. Нехтуючи впливом активного опору на величину пускового струму, визначити як зміниться пусковий струм і пусковий момент асинхронного двигуна, якщо частота мережі живлення зменшиться в «а» разів. Напругу мережі вважати незмінною.
12. Для асинхронних короткозамкнених двигунів, каталожні дані яких наведені в таблиці 5.2, визначити активний опір, який необхідно включити в кожну фазу обмотки статора, щоб зменшити величину пускового струму в 2 рази.

Таблиця 5.2

№ п/п	P_H	U_H	n_H	I_H	K_I	Схема з'єднання	$\cos \varphi_K$
	кВт	В	об/хв	А	-		-
1	7,5	380	905	19,3	4,4	Зірка	0,4
2	55	220	1460	170	7,5	Трикутник	0,3
3	22	500	730	34,8	6	Зірка	0,38
4	3	220	2880	11,6	7	Трикутник	0,48
5	2,2	127	1400	8,1	7,5	Трикутник	0,5
6	100	380	1470	99	7	Зірка	0,4

13. Для асинхронного двигуна, що має наступні параметри ротора: $r_2 = 0,2$ Ом, $X_2 = 1$ Ом при $f = 50$ Гц, $K_E = 2$, обмотка ротора з'єднана зіркою, визначити опір пускового реостата і величину пускового моменту і струму при реостатному пуску, якщо $U_1 = 220$ В, з'єднання обмотки статора – трикутник, $2p = 4$. Пусковий реостат повинен знизити струм в 2 рази.
14. Для асинхронного двигуна $P_H = 35$ кВт, $U_H = 380$ В, $n_H = 730$ об/хв, $\eta_H = 88\%$, $\cos \varphi_H = 0,81$, з'єднання обмотки статора – зірка, $E_2 = 125$ В при нерухомому роторі, номінальний струм ротора $I_{2H} = 188$ А, $r_2 = 0,01$ Ом. Визначити опір реостата в колі ротора, при якому двигун розвиває найбільший пусковий і обертовий момент, а також усталену швидкість, яку двигун досягне, якщо після закінчення пуску при номінальному навантаженні реостат залишити повністю введеним.

15. Асинхронний двигун живиться від мережі $U_H = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$ і має $M_{\Pi} = 4,75 \text{ кГм}$, $I_{1\Pi} = 95,8 \text{ А}$, $I_{2\Pi} = 100,6 \text{ А}$, з'єднання фаз статора – трикутник, а ротора – зірка. Параметри статора наступні: $r_1 = 0,4 \text{ Ом}$, $L_1 = 4 \text{ мГн}$, а ротора: $r_2 = 0,2 \text{ Ом}$, $L_2 = 2 \text{ мГн}$. Визначити: а) як зміниться пусковий струм і момент, якщо частота мережі буде $f = 25 \text{ Гц}$; б) як зміниться пусковий струм і момент при $U_1 = 0,5U_H$.
16. Визначити пускові та робочі параметри ротора глибокопазного асинхронного двигуна, що має такі дані: частота мережі $f = 50 \text{ Гц}$, матеріал обмотки ротора – алюміній, глибина паза $h_{\Pi} = 3 \text{ см}$, опір стрижня клітки $r_{2\text{кл}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, опір елемента кільця $r_{2\text{к}} = 0,1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, індуктивний опір розсіювання обмотки ротора $X_2 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$, враховуючи, що коефіцієнти магнітної провідності розсіювання становлять: пазового $\lambda_{\Pi 2} = 4$, диференціального $\lambda_{\text{д}2} = 2$, лобового $\lambda_{\text{л}2} = 2$, а коефіцієнт приведення $K = 3 \cdot 10^3$.
17. Визначити пусковий момент і його кратність глибокопазного АД, якщо $f = 50 \text{ Гц}$, $P_H = 250 \text{ кВт}$, $U_H = 3000 \text{ В}$, з'єднання обмотки статора – зірка, $n_H = 960 \text{ об/хв}$, матеріал обмотки ротора – мідь, висота паза ротора $h_{\Pi} = 4 \text{ см}$, параметри ротора $X_{2\Pi} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$, $X_{2\text{л}} = 10^{-4} \text{ Ом}$, $r_{2\text{кл}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, $r_{2\text{к}} = 20 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$, $Z_2 = 80 \text{ Ом}$. Параметри статора: $W_1 = 200$, $K_{\text{об}1} = 0,9$, $r_1 = 1,05 \text{ Ом}$, $X_1 = 3 \text{ Ом}$, $\sigma_1 = 1,05$.
18. Для двохкліткового АД визначити пусковий, максимальний і номінальний моменти, якщо відомі параметри схеми заміщення з винесеним на за тискачі контуром холостого ходу і дані заводського щитка, наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

№ п/п	P_H кВт	U_H В	n_H об/хв	R_1 Ом	X_{pn} Ом	R_n Ом	X_1 Ом	X_p Ом	R_p Ом
1	250	3000	980	0,7	3	3	2,5	4	1
2	400	6000	1470	1,0	4	3,5	3	5	1,2
3	320	3000	980	0,4	2,9	2,7	3,2	4,5	0,9
4	500	6000	1485	0,8	4,8	4	4,0	5,5	1,1
5	250	3000	735	0,5	3	3,5	2,9	4	0,9
6	630	6000	1485	0,6	5,0	4,2	2,7	4,8	0,9
7	200	3000	490	0,5	3	2,8	2,9	3,6	0,7

6 Якірні обмотки трифазних машин змінного струму (домашнє завдання з набором варіантів, таблиця 6.1)

1. Побудувати зірку пазових ЕРС (основної гармонічної);
2. Накреслити розгорнуту схему обмотки;
3. Побудувати криву МРС для двох моментів часу, що відповідають $i_A = i_{Amax}$ і $i_A = 0$;
4. Визначити обмоткові коефіцієнти для 1-ї, 3-ї, 5-ї, і 7-ї гармонічних;
5. Провести гармонічний аналіз кривої магнітної індукції (вважаючи повітряний проміжок рівномірним) і гармонічний аналіз ЕРС, що індукується в обмотці;
6. Порівняти величини основної і вищих гармонік в кривій поля і кривій ЕРС;
7. Оцінити величину діючого значення фазної та лінійної ЕРС обмотки.

Таблиця 6.1

№ п/п	Група "А"			Група "Б"			Група "В"		
	p	Z	Крок об- мотки	p	Z	Крок об- мотки	p	Z	Крок об- мотки
1	1	15	укороч.	5	51	укороч.	6	63	укороч.
2	2	15	-//-	7	63	-//-	7	51	-//-
3	3	27	-//-	8	69	-//-	8	57	-//-
4	4	27	-//-	1	57	-//-	1	33	-//-
5	5	33	-//-	2	42	-//-	2	27	-//-
6	6	45	-//-	4	51	-//-	3	27	-//-
7	7	45	-//-	5	54	-//-	4	36	-//-
8	8	51	-//-	1	63	подовж.	5	42	-//-
9	1	21	подовж.	2	45	-//-	7	54	-//-
10	2	18	-//-	4	54	-//-	8	60	подовж.
11	3	45	-//-	5	57	-//-	1	39	-//-
12	4	30	-//-	1	69	-//-	2	30	-//-
13	5	36	-//-	2	51	-//-	4	39	-//-
14	6	54	-//-	4	57	укороч.	5	45	-//-
15	7	48	-//-	5	63	-//-	7	57	-//-
16	8	54	укороч.	2	54	-//-	8	63	-//-
17	1	27	-//-	4	60	-//-	1	45	-//-
18	2	21	-//-	2	57	-//-	2	33	укороч.
19	3	63	-//-	4	63	-//-	3	42	-//-
20	4	33	-//-	2	63	-//-	5	48	-//-
21	5	39	-//-	2	48,a=1	Одн.конц. двоплощ.	7	60	-//-
22	2	36,a=2	Одн.шабл.	2	36,a=1	Одн.конц. двоплощ.	8	66	-//-
23	2	48,a=1	Одн.шабл.	2	48,a=2	Одн.шабл.	1	51	-//-
24	3	36,a=1	Одн.шабл.	1	18,a=1	Одн.конц.	2	39	-//-
25	2	24,a=1	Одн.шабл.	3	36,a=1	Одн.шабл.	4	45	-//-

Скорочення, прийняті в таблиці 6.1:
 укороч. – укорочений
 подовж. – подовжений
 одн.шабл. – одношарова шаблонна
 одн.конц. – одношарова концентрична
 двоплещ. – двоплещинна

Відповіді до завдань:

1. $F_1=1640$ А; 2. $F_1=1240$ А; 3. $B_8 = 0,750$ Тл; 4. $I_0 = 3,8$ А; 5. $I_m=12,4$ А; 6. $I_{m2}/I_{m1}=1,73$; 7. $K_{061}=0,935$, $K_{063}=-0,5$, $K_{065}=0,067$; 8. $E_1=7,92$ В, $E_3=0,985$ В, $E_5=0$; 9. $E_K=73$ В, $E_1=70$ В, $E_3=15,85$ В, $E_5=13,15$ В; 10. $E_\phi=12,4$ В; $E_\pi=19,15$ В; 11. $E_1=7,05$ В, $E_3=2,35$ В, $E_5=1,42$ В; 12. $E_1=8,2$ В, $E_3=0$; 13. (до вар. 3), $E_1=1,127$ В, $E_3=0,125$ В, $E=1,13$ В; 14. $E_1=7,18$ В, $E_3=0,49$ В; 15. $E_\phi=107$ В, $E_A=185$ В.
2. 1. $E_{500}=100$ В, $E_{950}=10$ В, $E_{1500}=100$ В; 2. $I_{н.л}=96$ А, $I_{н.ф}=55,4$ А, $M_H=16,6$ кГм, $S=0,02$, $f_2=1$ Гц; 3. $E_1=206$ В, $E_{2S}=1,6$ В, $K_e=5,18$; 4. $E_1=200,8$ В; 5. $U_{max}=740$ В, $U_{min}=20$ В; 6. $E_2=285$ В, $E_{2S}=11,4$ В; 7. $E_2=400$ В, $f_2=100$ Гц; 8. $S=0,05$, $n_2=150$ об/хв; 9. $I_2=83$ А; 10. $I_K=4650$ А; 11. $r_2=0,0138$ Ом, $x_2=0,03$ Ом; 12. $\Delta I_c=31,2$ А; 13. $S=0,03$, $2p=4$; 14. $n_1=30$ сек⁻¹, $n=28,8$ сек⁻¹; 15. $S=0,02$.
3. 1. $M_m=167$ кГм, $M_\pi=120$ кГм, $I_\pi=686$ А; 2. $M_\pi=4,18$ кГм; 3. $S=0,03$, $M_{EM}=4,5$ кГм; 4. $S_m=0,214$; 5. $K_m=2,4$, $n=960$ об/хв; 6. $M_m=560$ Нм, $M_\pi=280$ кГм, $S_m=0,2$, $I_\pi=294$ А; 7. $K_I=5$, $K_\pi=1,11$, $K_M=2,32$; 8. $K_\pi=1,54$; 9. $M_m=62,5$ кГм, $M_\pi=24,7$ кГм, $K_I=3,3$; 10. $I_{1\pi}=35$ А, $I_{2\pi}=175$ А, $M_m=4,45$ кГм; 11. $K_I=0,605$, $K_M=1,8$; 12. $\Delta U_{max}=39\%$; 13. $P_2=10,4$ кВт, $S=0,0533$; 14. $M_\pi=47,8$ Нм; 15. $M_H=46,7$ кГм, $M_m=98$ кГм.
4. 1. $\eta_H = 90,3\%$; 2. $\eta_H = 90,1\%$; 3. $\cos \varphi_1 = 0,4$; 4. $\cos \varphi_1 = 0,725$; 5. $P_2=15,2$ кВт, $P_{EM}=30,4$ кВт, $P_1=34$ кВт, $\Delta P_2=45,6$ кВт; 6. $P_2=32$ кВт, $P_{EM}=25,6$ кВт, $P_1=22,6$ кВт, $\Delta P_2=6,4$ кВт, $S=-0,25$; 7. $I_H=223$ А, $M_H=1037$ кГм, $S_H=0,06$, $f_2=3$ Гц, $P_{M1}+P_{M2}=35$ кВт; 8. $P_{M2}=445$ Вт, $P_{мех}=796$ Вт; 9. $\eta_H = 94,5\%$; 10. $\eta = 91\%$; 11. $r_p=2,33$ Ом; 12. $P_2=40$ кВт, $n=1475$ об/хв, $\cos \varphi = 0,912$, $\eta = 90\%$; 13. $P_{M1}=420$ Вт, $P_{M2}=280$ Вт, $P_{ст}=170$ Вт, $P_{дод}=150$ Вт, $\eta = 89,7\%$; 14. $P_2=7$ кВт, $P_1=8,33$ кВт, $I_1=13,4$ А, $M=2,34$ кГм, $\eta = 84\%$, $\cos \varphi_1 = 0,95$, $S=0,03$; 15. див. №14.
5. 1. $I_\pi=825$ А; 2. $Z_p=1,57$ Ом, $K_{1np}=6,8$, $K_{1peak}=3,4$; 3. $Z_p=14,27$ Ом; 4. $r_d=0,358$ Ом, $I_\pi=110$ А, $K_I=5,5$; 5. $K_\pi=0,223$; 6. $r_d=0,875$ Ом; 7. $n=1330$ об/хв; 8. $r_d=0,74$ Ом; 9. $r_d=0,22$ Ом; 10. $M_\pi=69$ кГм, $K'_M=0,104$; 11. Струм збільшиться в «а» разів, а момент в «а³» разів; 12. $r_d=3,6$ Ом; 13. $I_\pi=46,7$ А, $M_\pi=10$ кГм, $r_\pi=1,57$

Ом; 14. $r_{\Pi}=0,07$ Ом, $n=580$ об/хв; 15. а) Струм збільшиться в 1,78 рази, а момент в збільшиться 6,32 рази; б) момент зменшиться в 4 рази, а струм зменшиться в 2 рази; 16. Для $S=1$: $x'_2=1,11$ Ом, $r'_2=0,32$ Ом; для $S=S_H$: $x'_2=1,5$ Ом, $r'_2=1,153$ Ом; 17. $M_{\Pi}=3672$ Нм, $K_{\Pi}=1,475$; 18. $M_m=5063$ Нм, $M_H=2117$ Нм, $M_{\Pi}=2820$ Нм.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Кацман М.М., Электрические машины. М., Высшая школа, 1990. -464 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
4. Костенко М.П. Электрические машины, т.2 / М.П. Костенко, Д.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
5. Куликов А.А. Сборник задач по электрическим машинам / А.А. Куликов, М.И. Немировский. – М.-К.: Машгиз, 1961. – 200 с.
6. Меркин Г.Б. Электрические машины и трансформаторы: пособие по решению задач / Г.Б. Меркин, Н.П. Титов, С.П. Печерица. – Л.: Изд-во Северо-Зап. заоч. политех. ин-та, 1969. – 277 с.
7. Петров Г.Н. Электрические машины, т.2 / Г.Н. Петров. – М. -Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.